

N° d'ordre :

THÈSE

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

pour obtenir

Le Grade de Docteur ès Sciences Physiques

Laboratoire AIME COTTON C.N.R.S.

par

Patrick BOUCHAREINE

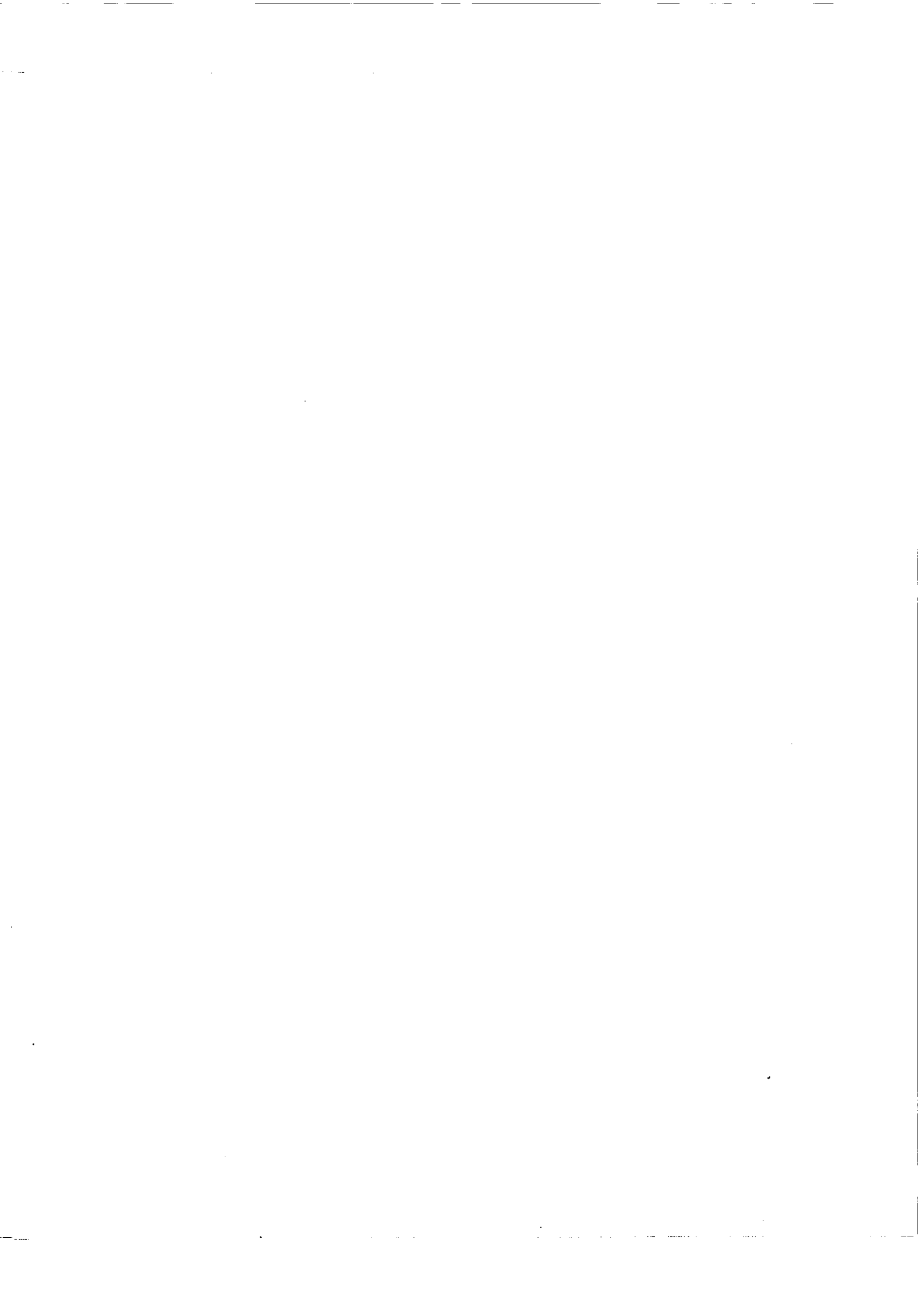
SUJET de la THESE : Etude du récepteur photographique appliqué à
la spectroscopie. Spectrographie par grille.

Soutenue le Juin 1970 devant la commission d'examen

M. P. JACQUINOT.....Président

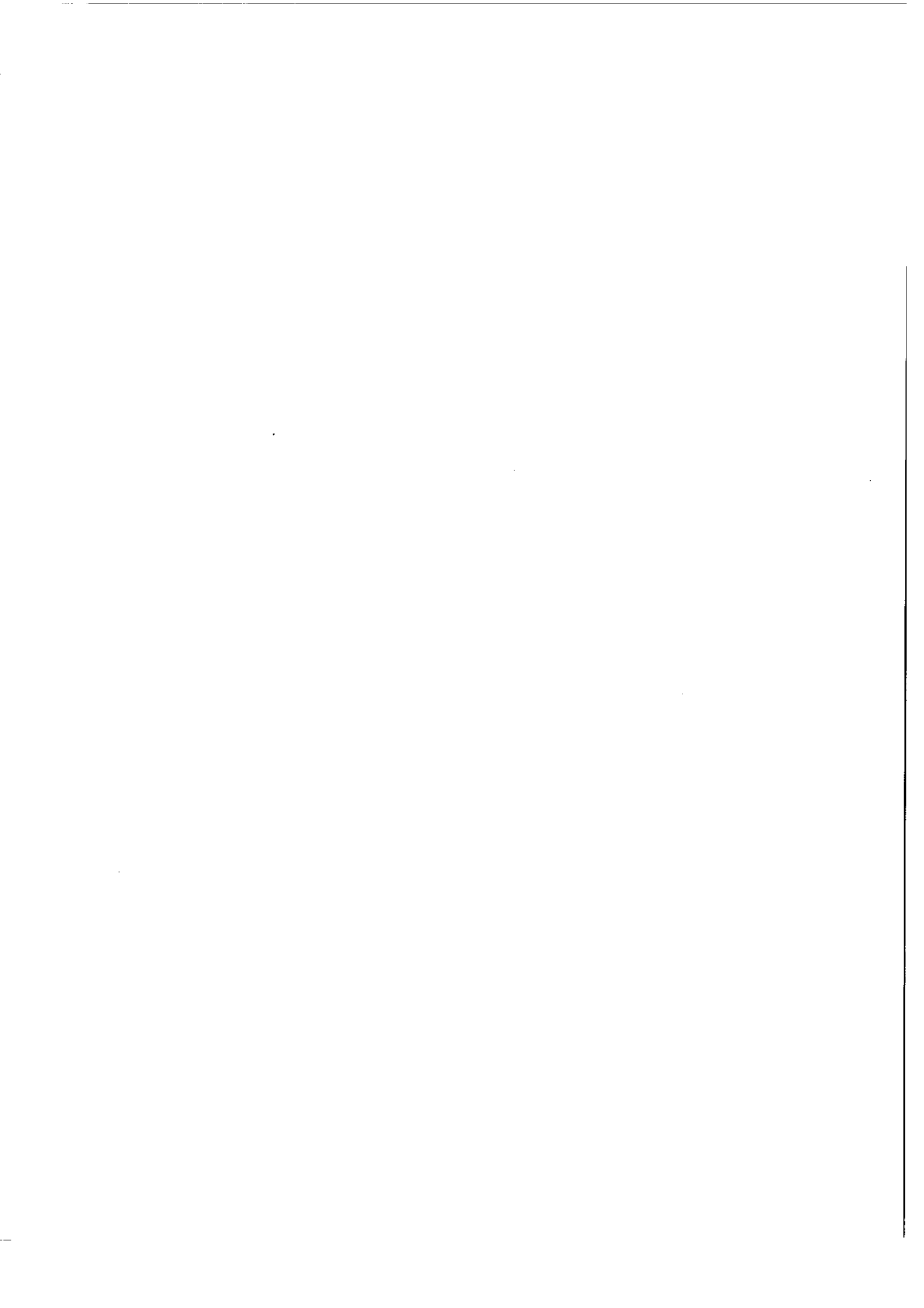
MM. A. BLANC-LAPIERRE .. }
R. CHABBAL..... .. } Examineurs
C. FEHRENBACH..... }
A. GIRARD..... }

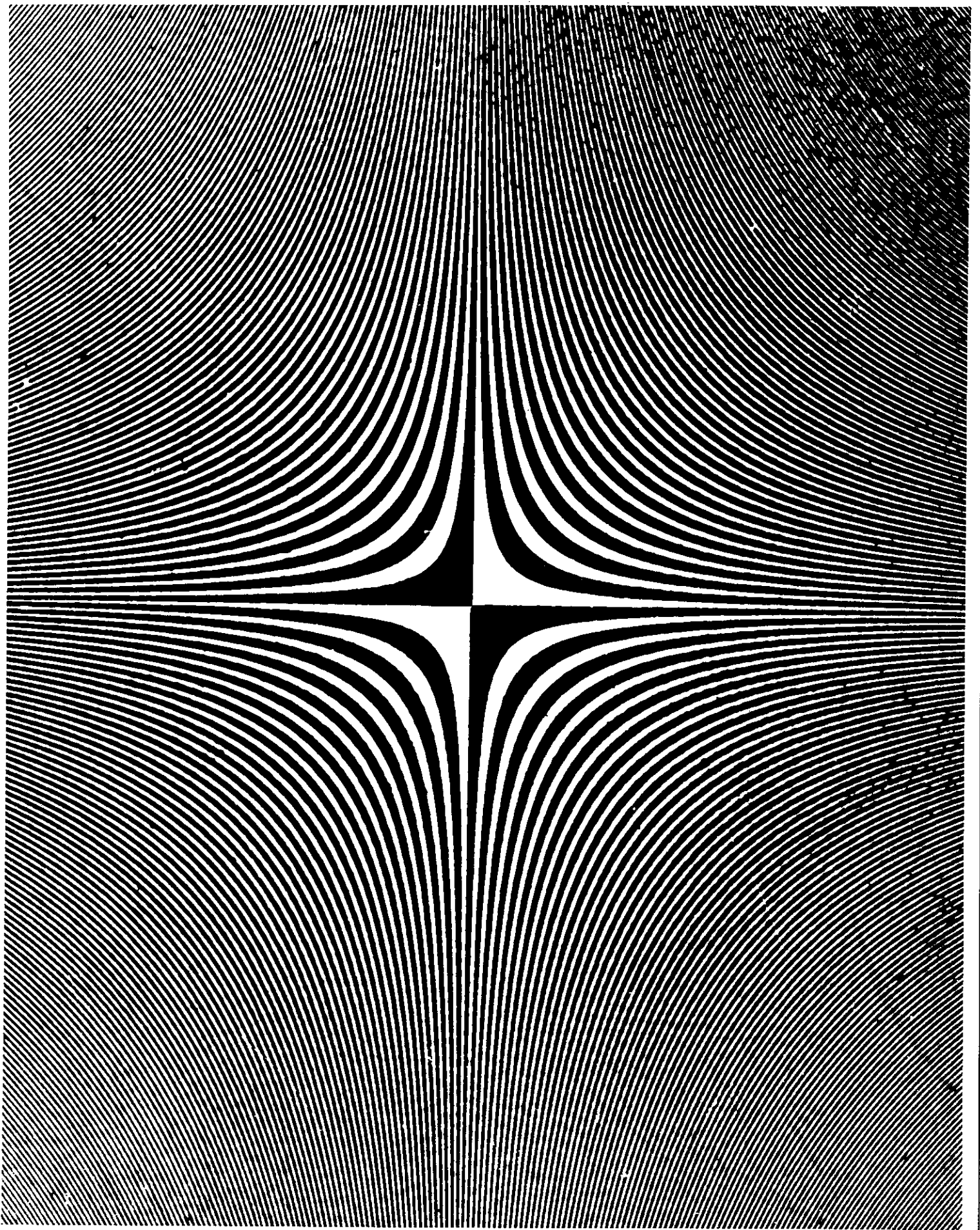
ORSAY 1970

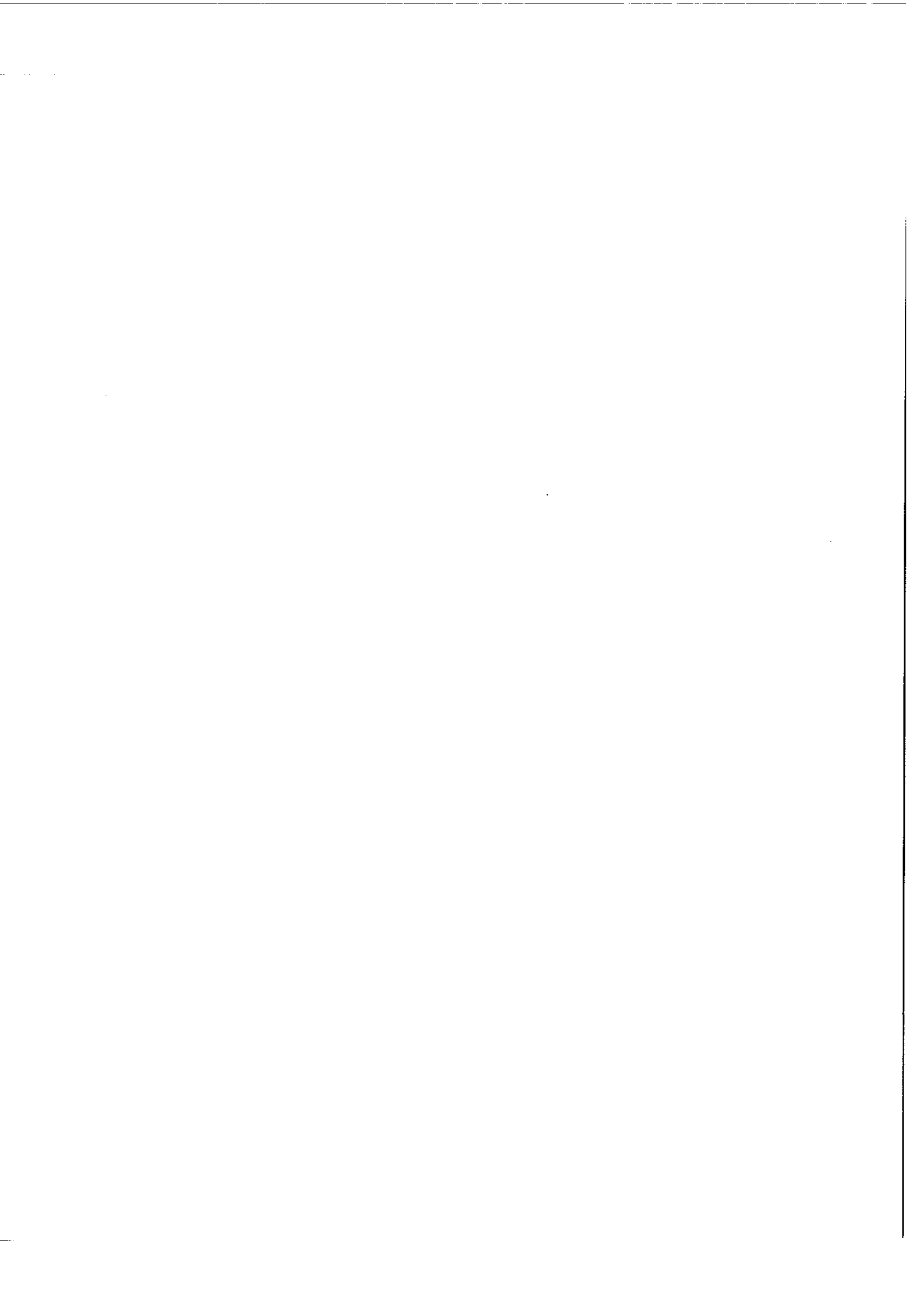




Pendant tous ces discours, le Cicéron moderne
Parlait éloquemment, et ne se lassait point.
Il n'avait oublié qu'un point:
C'était d'éclairer sa lanterne.







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

INTRODUCTION

C H A P I T R E I - R A P P E L S U R L ' U T I L I S A T I O N D E S R E C E P T E U R S E N S P E C T R O M E T R I E

- I.1 - Progrès réalisés en spectrométrie.
- I.2 - Bruit de récepteur et bruit de photons.
- I.3 - Flux et éclaircissement. Etendue et angle solide.
- I.4 - Modulation d'amplitude et multiplexage.
- I.5 - Montages multicanaux.
- I.6 - Le multirécepteur photographique.

C H A P I T R E II - N A T U R E D U B R U I T E T C L A S S I F I C A T I O N D U R E C E P T E U R
P H O T O G R A P H I Q U E .

- II.1 - Rappels sur le signal.
- II.2 - Rappels sur le bruit.
- II.3 - Rappels sur la définition du rapport signal sur bruit.
- II.4 - Rappel sur la définition du rendement quantique équivalent.
- II.5 - Etude expérimentale du rendement quantique équivalent.
- II.6 - Lois de variation du rapport signal sur bruit.
- II.7 - Conclusion.

C H A P I T R E III - APPLICATION AUX SPECTROMETRES A FENTE.

- III.1 - Luminosité des spectrographes : la loi $L \times R^2 = \text{cte.}$
- III.2 - Etude du rapport signal sur bruit. Comparaison aux spectrographes.
- III.3 - Etablissement d'un facteur de mérite pour les spectrographes.

C H A P I T R E IV - APPLICATION A D'AUTRES METHODES SPECTROGRAPHIQUES.

- IV.1 - Spectrographie par grille.
- IV.2 - Spectrographie multiplex.
- IV.3 - Spectrographie Fabry-Perot.

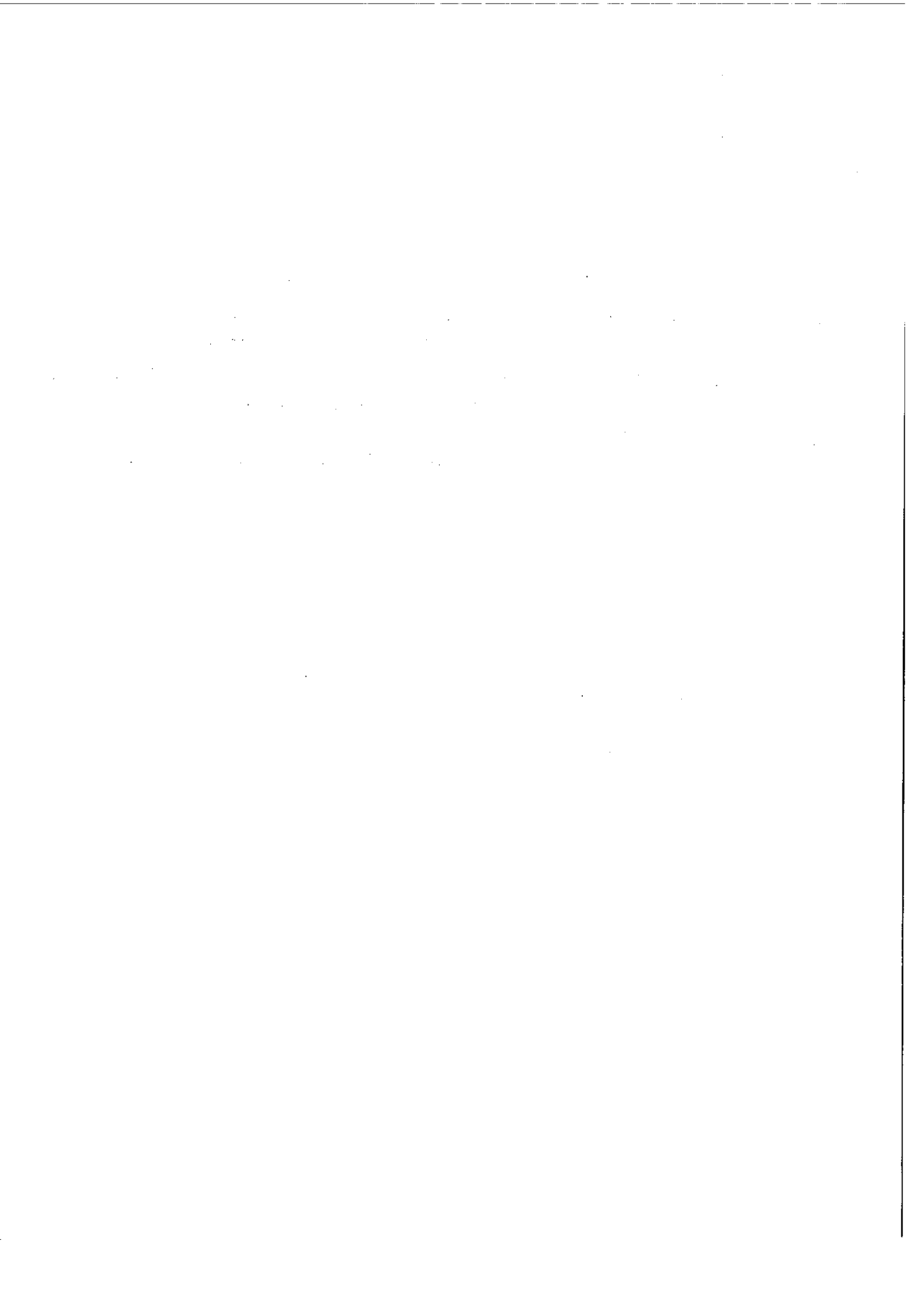
C H A P I T R E V - CONCLUSION.

A P P E N D I C E - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA SPECTROGRAPHIE PAR GRILLE.

- A.1 - Principe de la méthode.
 - A.2 - Description du montage optique.
 - A.3 - Description de l'équipement électronique.
 - A.4 - Résultats expérimentaux.
 - A.5 - Conclusion.
-

NOTATIONS

- B Luminance exprimée en nombre de photons émis par unité de temps et d'étendue de faisceau.
- D Densité d'une émulsion $D = \log_{10} \frac{E_0}{E}$
- G Gain de flux, d'étendue, de rapport signal sur bruit etc..
- M Nombre d'éléments spectraux dans un spectre (signification légèrement différente pour les appareils à grille).
- n Nombre de photons par unité de surface (éclairage x temps)
- N Nombre global de photons.
- Q Rendement quantique
- R Pouvoir de résolution
- T Durée d'une mesure
- \mathcal{E} Coefficient de transmission d'une émulsion
- U Etendue de faisceau $U = \Omega \times S$
- γ Pente de la caractéristique $D = f(\log n)$
- λ Longueur d'onde
- Ω Angle solide d'un faisceau
- ρ Rapport signal sur bruit
-
-



I N T R O D U C T I O N

Lorsque nous avons commencé notre travail au laboratoire Aimé Cotton le récent succès des méthodes de corrélations appliquées à la spectrométrie par A. GIRARD nous a incité à prolonger les recherches dans le domaine de la photographie. Les premiers résultats publiés à l'occasion du colloque international de Spectroscopie instrumentale tenu à ORSAY en Avril 1966 demandaient une étude plus approfondie des propriétés du récepteur lui-même pour une bonne interprétation des phénomènes observés.

Cette étude bibliographique primitivement destinée à servir d'introduction à notre travail expérimental nous ayant entraîné plus loin que prévu nous avons finalement préféré en faire un tout cohérent, débordant certainement le cadre précis de la spectrographie par grille pour ne donner à cette dernière qu'une importance qui ne déséquilibre pas l'exposé. C'est la raison pour laquelle dans le chapitre IV la spectrographie par grille est traitée sur un plan théorique au même niveau que les autres méthodes. Nous avons regroupé séparément dans l'appendice l'ensemble des résultats expérimentaux que nous avons obtenus dans l'utilisation photographique d'une grille, les uns étant une vérification des lois énoncées dans le chapitre IV,

les autres en étant indépendants.

Nos deux activités, théorique et instrumentale ont d'ailleurs été beaucoup plus intimement mêlées qu'il n'apparait dans cette rédaction et pendant que nous précisions nos idées sur le récepteur photographique, le montage spectrographique à grille se perfectionnait jusqu'à la réalisation dans le courant de 1969 d'un prototype industriel construit par la Société R.E.O.S.C.. Ce montage nous a permis de travailler dans des conditions beaucoup plus aisées et d'obtenir des premiers résultats sur une source réelle étudiée au Laboratoire de Chimie Physique à Saclay.

Le chapitre I est un rappel des progrès réalisés ces derniers temps en spectrométrie et des propriétés connues des récepteurs usuels. Après avoir rappelé au début du chapitre II les lois classiques du bruit photographique, nous donnons le raisonnement qui, appuyé sur ces lois, nous a conduit à considérer la plaque comme un récepteur sensible au bruit de photons. L'application faite dans le chapitre III de ces mêmes lois aux spectrographes à fentes nous permet de faire un parallèle entre spectromètres et spectrographes qui confirme les conclusions du chapitre II. Les nouvelles méthodes spectrographiques sont étudiées dans le chapitre IV. L'appendice (ou chapitre V) décrit nos résultats expérimentaux en spectrographie par grille et l'appareil qui a été réalisé.

=====

CHAPITRE I

RAPPEL SUR L'UTILISATION DES RECEPTEURS
EN SPECTROMETRIE

I - 1 - PROGRES REALISES EN SPECTROMETRIE:

Le but du spectroscopiste instrumental est la mise au point d'appareils et de méthodes permettant d'obtenir d'une source donnée le maximum d'informations dans un minimum de temps. Quel que soit l'appareil utilisé la lumière finit toujours par tomber sur un récepteur, qui est l'oeil dans les spectroscopes que nous ne citons que pour mémoire, une cellule photoémissive, photoconductrice, thermique etc... dans le cas des spectromètres, et une plaque ou un film photographique dans le cas des spectrographes.

Un spectromètre ou un spectrographe est caractérisé par sa fonction d'appareil qui est représentée par sa réponse lorsqu'il est éclairé par une radiation monochromatique. La largeur de la fonction d'appareil $\delta\lambda$ ou $\delta\sigma$ à mi hauteur définit la limite de résolution de l'instrument. On caractérise aussi son aptitude à séparer des radiations voisines par son pouvoir de résolution:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\sigma}{\delta\sigma}$$

La hauteur de la fonction d'appareil d'un spectromètre est représentée par le flux maximum transmis lorsque l'instrument est centré sur la longueur d'onde de la radiation incidente. Dans le cas des spectromètres on définit la luminosité de l'instrument par

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi_M}{B} \quad B \text{ luminance de la source.}$$

Pour un spectromètre donné on sait que si on est suffisamment loin de ses possibilités ultimes en résolution, la hauteur de la fonction d'appareil, donc la luminosité, est proportionnelle à $\frac{1}{R}$ (il en résulte que le flux transmis pour une source émettant un spectre continu est proportionnel à $\frac{1}{R^2}$). L'existence de cet invariant, produit de la luminosité par le pouvoir de résolution permet la définition d'un facteur de mérite et la comparaison de méthodes et d'appareils différents [1] .

Une manière d'accroître ce facteur de mérite est d'augmenter les dimensions des pupilles. On est rapidement limité dans cette voie.

La grande dispersion angulaire des réseaux donne à ceux-ci sur les prismes un avantage important en facteur de mérite bien que le faible éclairement observé dans le plan focal d'un spectromètre ou un spectrographe à réseau, dû précisément à cette grande dispersion, ait fait croire un temps à la faible " luminosité " des réseaux.

L'interféromètre de Fabry-Perot a l'avantage d'un angle solide très supérieur, à résolution donnée, à celui délivré par un réseau et surtout un prisme. En comparant à un réseau utilisé en montage Littrow sous l'incidence i avec une hauteur angulaire de fente égale à β , le gain d'angle solide est

$$G = \frac{\Omega_{FP}}{\Omega_R} = \frac{\pi}{\beta \operatorname{tg} i}$$

ce qui donne une valeur supérieure à 600 pour $i = 30^\circ$ et $\beta = 10^{-2}$ rad.

Bien que la surface d'un interféromètre de Fabry-Perot soit en général inférieure à celle d'un réseau, le premier est toujours beaucoup plus lumineux à résolution égale [2] .

Un grand progrès a été réalisé grâce aux méthodes à modulation sélective. Plutôt que d'éliminer le flux parasite des éléments spectraux voisins comme le font les lèvres d'une fente, on laisse une grosse partie du flux émis par la source atteindre le récepteur mais on ne module que l'élément spectral à mesurer soit par un procédé interférentiel comme dans le SISAM [3], soit par un procédé d'imagerie comme dans le spectromètre à grille GIRARD [4], soit par un procédé mixte [5] .

Un très important progrès a été enfin obtenu grâce aux méthodes multiplex pour lesquelles on attribue à tous les éléments spectraux des modulations orthogonales, ce qui permet de recevoir simultanément sur un seul récepteur le flux de tous ces éléments, et on revient à l'amplitude de chaque composante du spectre par une analyse appropriée. Par exemple dans la méthode de spectrométrie par Transformation de Fourier, on module tous les éléments spectraux à des fréquences différentes. C'est par une analyse de fréquence effectuée sur le signal ainsi recueilli que l'on séparera les différents éléments spectraux. Là encore la modulation peut être obtenue interférométriquement [6] ou par des grilles [7,8] . Les méthodes interférentielles peuvent encore gagner en étendue par les méthodes de compensation [9,10,11] du champ d'interférence.

L'évaluation des avantages respectifs de ces différentes méthodes exige la connaissance des propriétés du récepteur qui, en fin de compte, transforme le signal optique en une information exploitable (enregistrement, données numériques).

I - 2 - BRUIT DE RECEPTEUR ET BRUIT DE PHOTONS:

La mesure d'un flux lumineux est toujours perturbée par des fluctuations aléatoires qui constituent le bruit. Une classification de la

plus grande partie des détecteurs électromagnétiques (y compris l'oeil et les antennes) a été faite par R. Clark JONES en 1953 [12] d'après les propriétés du bruit présenté par ces détecteurs. On peut distinguer, en simplifiant la classification de JONES, trois types de récepteurs.

1°) Les récepteurs thermiques (Golay, bolomètres). Les fluctuations du signal viennent des fluctuations de température du récepteur qui échange par rayonnement de l'énergie avec le milieu ambiant.

2°) Les récepteurs à bruit interne (cellule PbS, plaque photographique) qui présentent des fluctuations dues à la structure du récepteur.

3°) Les cellules photoélectriques qui, en l'absence de signal ne présentent qu'un bruit très faible. Pour ces cellules le bruit n'est pas constant et dépend du flux reçu. Le bruit traduit la nature discontinue de l'énergie électromagnétique constituant le signal.

Dans les deux premiers cas on peut dire que l'on a un bruit de récepteur. Les récepteurs utilisés dans le domaine infrarouge entrent dans cette catégorie. L'amplitude du bruit qu'ils présentent ne dépend pas de celle du signal incident.

Dans le troisième cas il s'agit du bruit de photons, dont l'amplitude est proportionnelle à la racine carrée de celle du signal mesuré, observé avec les photomultiplicateurs des domaines visible et ultra-violet, les compteurs X et γ .

I - 2.1 LOI DE VARIATION DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT DANS LE CAS DU BRUIT DE PHOTONS:

Nous désignons par :

B la luminance de la source mesurée en nombre de photons émis par unité de temps, de surface de la source et d'angle solide.

U l'étendue du faisceau admise sur le récepteur.

T le temps total de la mesure.

ρ le rapport signal sur bruit.

Le nombre de photons reçu par le récepteur au cours de la mesure est

$$N = B \times U \times T$$

Si Q est le rendement quantique de ce récepteur le nombre de photons effectivement comptés est

$$Q \times B \times U \times T$$

et le rapport signal sur bruit est :

$$\rho = \sqrt{Q \times B \times U \times T}$$

proportionnel à la racine carrée du flux transmis et du temps consacré à la mesure. Il est en particulier indépendant de l'angle solide Ω du faisceau au niveau du récepteur.

I - 2.2 GENERALISATION DE LA NOTION DE RENDEMENT QUANTIQUE :

Par analogie avec ce cas R.C. JONES a défini en 1958 [13] un rendement quantique équivalent pour n'importe quel type de récepteur. Si au cours d'une mesure N photons sont tombés sur le récepteur donnant sur N une incertitude δN le rapport signal sur bruit est

$$\rho = \frac{N}{\delta N} \quad (1)$$

C'est ce même rapport signal sur bruit que l'on aurait obtenu avec un récepteur du type précédent de rendement quantique Q' tel que

$$\frac{N}{\delta N} = \sqrt{Q' \cdot N}$$

On peut donc dire que dans cette mesure le rendement quantique équivalent du récepteur est défini expérimentalement par

$$Q' = \frac{N}{(\delta N)^2} \quad (2)$$

I - 2.3 LOI DE VARIATION DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT DANS LE CAS DU BRUIT DE RECEPTEUR.

Le flux tombant sur le récepteur est

$$\Phi = B.U$$

donnant un signal instantané, qui peut être par exemple un courant ou une tension électrique

$$k.B.U$$

Le résultat de la mesure effectuée pendant un temps T est

$$\int_{t_0}^{t_0+T} k.B.U dt = k.B.U.T$$

Le bruit $b(t)$ est supposé gaussien. Sa valeur moyenne est nulle et si son écart quadratique moyen obtenu avec une constante de temps égale à l'unité de temps est b , les intégrales

$$\int_{t_0}^{t_0+T} b(t) dt$$

obtenues pour diverses valeurs de t_0 ont une valeur moyenne nulle et leur écart quadratique moyen est égal à $b\sqrt{T}$.

Le rapport signal sur bruit est donc

$$\rho = \frac{k}{b} . B.U . T \quad (3)$$

Il est toujours proportionnel à la racine carrée de T (ce résultat est très général) mais il est maintenant proportionnel à U et à B , ce qui distingue très clairement un récepteur à bruit propre d'un récepteur sans bruit.

I - 2.4 ADAPTION DU RECEPTEUR AU FAISCEAU:

La loi (3) peut prendre une forme différente en fonction de U si on cherche à adapter le récepteur au faisceau. Il faut pour étudier ce cas connaître la loi de variation du bruit b et du rapport k en fonction des conditions d'utilisation. Nous traiterons l'exemple des cellules à bruit interne du type PbS.

La grandeur mesurée est la variation relative $\frac{\Delta R}{R}$ de résistance de la cellule due à l'illumination. Cette variation est proportionnelle à l'éclairement (supposé uniforme sur toute la cellule). Elle est donc pour un flux donné, proportionnelle à l'inverse de la surface du récepteur.

L'amplitude des fluctuations relatives de résistance est proportionnelle à ^{l'inverse de} la racine carrée de la surface de ce récepteur.

On peut donc, en désignant par b_1 et k_1 les valeurs de ces paramètres pour un récepteur de surface unité mettre le rapport signal sur bruit sous la forme.

$$\rho = \frac{k_1}{b_1} B \cdot U \cdot \sqrt{\frac{T}{S}}$$

Or, si Ω désigne l'angle solide du faisceau tombant sur le récepteur

$$U = S \cdot \Omega$$

donc

$$\rho = \frac{k_1}{b_1} B \sqrt{U \cdot T \cdot \Omega} \quad (4)$$

Le rapport signal sur bruit dépend maintenant de l'angle solide sous lequel est éclairé le détecteur. L'expression (4) met en évidence la nécessité d'utiliser un condenseur de grande ouverture.

I - 3 - FLUX ET ECLAIREMENT . ETENDUE ET ANGLE SOLIDE:

Les expressions (1) et (3) mettent en évidence l'intérêt de la définition de la luminosité donnée en I - 1. C'est en effet le flux transmis qui caractérise pour un temps de mesure donné la valeur du rapport signal sur bruit. C'est donc cette grandeur qui caractérise la valeur d'un spectromètre. A brillance de source donnée, ce flux ne dépend que de l'étendue de faisceau disponible qui pour un spectromètre travaillant à résolution donnée ne dépend que du disperseur, et pas des dispositifs optiques qui l'accompagnent.

Dans l'expression (4) au contraire apparaît le rôle non seulement de l'étendue de faisceau, mais aussi de l'angle solide de ce faisceau au niveau du récepteur. Dans ce cas le rapport signal sur bruit dépend non seulement du flux, mais aussi de l'éclairement du récepteur. Il faut toutefois remarquer que ce n'est pas l'objectif du spectromètre qui doit être très ouvert, ce qui conduirait à des pertes considérables en résolution angulaire, mais le dernier condenseur placé devant le récepteur. D'autre part pour les spectromètres à réseau équipés de fentes, l'étendue de faisceau disponible est tellement faible qu'il est impossible de trouver des récepteurs de dimensions suffisamment réduites pour pouvoir leur être adaptés avec une grande valeur de Ω . Dans ces conditions la recherche de Ω maximum devient inutile et la loi de variation de ρ redevient (3).

Les trois cas que nous venons d'étudier sont résumés dans le tableau I A qui donne la valeur du gain en rapport signal sur bruit obtenu lorsque un gain g est apporté sur l'une des trois grandeurs : Luminance de la source, étendue de faisceau disponible et temps de mesure.

GRANDEUR	BRUIT DE PHOTONS	BRUIT DE RECEPTEUR	
		Cellule PbS; $\Omega = \Omega_{Max}$	Bruit indépendant de Ω
B	\sqrt{g}	g	g
U	\sqrt{g}	\sqrt{g}	g
T	\sqrt{g}	\sqrt{g}	\sqrt{g}

TABLEAU I - A

I - 4 - MODULATION D'AMPLITUDE ET MULTIPLEXAGE:

I - 4.1 BRUIT DE RECEPTEUR:

I - 4.1.1 MODULATION D'AMPLITUDE:

Si une méthode de modulation d'amplitude apporte un gain g sur l'étendue du faisceau, le gain en rapport signal sur bruit est g ou \sqrt{g} suivant la nature du récepteur. En effet seul ce gain d'étendue est à prendre en considération (nous ne tenons pas compte des effets éventuels de la modulation) le flux parasite non modulé ne donnant lieu à aucun bruit.

I - 4.1.2 MULTIPLEXAGE:

Il s'agit maintenant, par rapport à un appareil à balayage séquentiel offrant une même étendue, d'un gain en temps de mesure, car chaque élément spectral est étudié pendant tout le temps d'étude du spectre. S'il y a M éléments spectraux étudiés, le gain en rapport signal sur bruit est \sqrt{M}

I - 4.2 BRUIT DE PHOTONS:

Dans ce cas les deux méthodes précédentes perdent leur intérêt

à cause du bruit apporté sur chaque élément spectral par les éléments spectraux voisins. Le gain en rapport signal sur bruit par rapport à une méthode classique peut alors prendre une valeur qui dépend essentiellement de la structure du spectre et qui pour certains éléments spectraux de faible intensité peut être très inférieure à 1. Malgré tout ces méthodes restent valables pour des spectres de raies peu nombreuses.

I - 5 - MONTAGES MULTICANAUX:

Dans le domaine où les récepteurs n'ont pas de bruit propre on voit donc que les méthodes décrites ci-dessus perdent leur avantage. Celles-ci peuvent être considérées dans une certaine mesure comme des artifices permettant de compenser l'imperfection des récepteurs bruyants. Pour gagner sur le nombre des éléments spectraux il devient nécessaire, avec les bons photomultiplicateurs, d'utiliser des montages multicanaux où les récepteurs travaillent en parallèle. De nombreuses tentatives ont été faites dans ce sens utilisant des fibres de verre, des miroirs ou des lentilles composés [14] [15]. La caméra électronique (Lallemand) est un autre exemple de dispositif multicanal de ce type, les éléments d'une photocathode étant individualisés par imagerie électronique.

I - 6 - LE MULTIRECEPTEUR PHOTOGRAPHIQUE:

La plaque photographique est un récepteur multicanal. Le très grand nombre de canaux indépendants qu'elle comporte en fait un récepteur irremplaçable pour l'étude de certains problèmes. Un montage Pascken Runge permet l'enregistrement simultané de plusieurs centaines de milliers de raies.

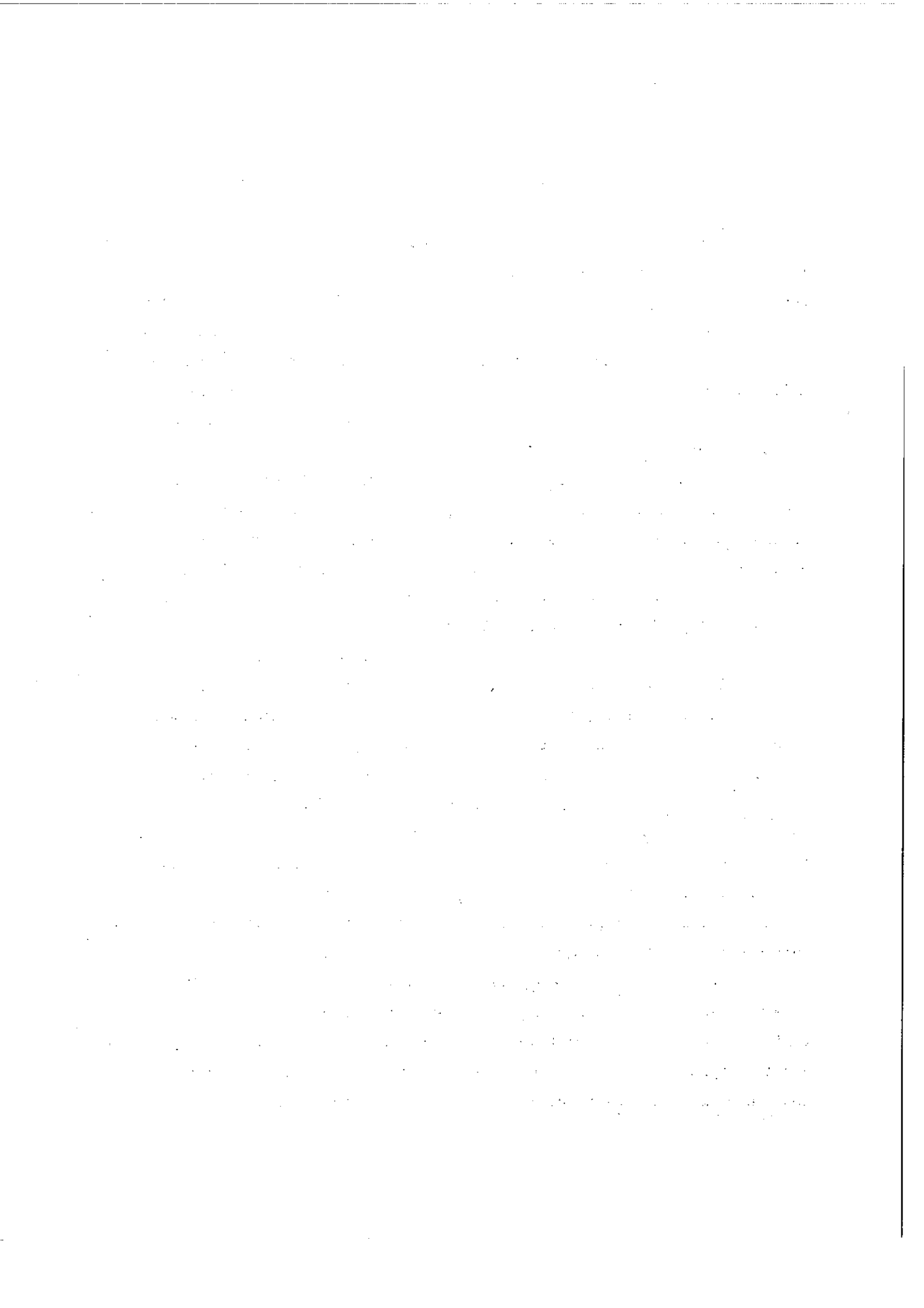
Le deuxième intérêt de la plaque photographique est la très grande valeur que l'on peut donner à la constante de temps qui lui est associée ce qui permet l'intégration de flux très faibles.

Ces deux avantages ont pour contre partie un certain nombre d'inconvénients qui expliquent l'abandon de plus en plus fréquent de ce récepteur en faveur des photomultiplicateurs. Il est en particulier significatif que les spectrographes n'ont pas connu de très profondes modifications dans leur conception. Les progrès réalisés depuis plusieurs dizaines d'années en spectrométrie commencent à peine à toucher le domaine de la photographie.

Les raisons qui déprécient la plaque photographique aux yeux des utilisateurs sont l'incommodité d'emploi, la non linéarité de la caractéristique (dont la conséquence est une faible dynamique) et un faible rendement quantique équivalent.

Dans sa classification de 1953 R.C. JONES [12] range le récepteur photographique dans la classe des récepteurs infrarouge, c'est à dire possédant un bruit propre. Une telle conclusion semble indiquer l'intérêt d'adjoindre à ce récepteur des méthodes du type multiplex ou à modulation sélective.

Un fait d'expérience semble confirmer ce point de vue: c'est l'importance attribuée par les utilisateurs et les constructeurs à la valeur du rapport d'ouverture de l'objectif équipant les appareils. Alors que dans un spectromètre on sait bien que la notion fondamentale est celle de flux transmis à résolution donnée, lequel ne dépend que du disperser, on caractérise beaucoup plus volontiers un spectrographe par l'angle solide de l'objectif de sortie. Ce point de vue s'explique par le fait qu'à la valeur de cet angle est lié le temps de pose pour une source donnée. Or la rapidité d'une mesure ne doit pas être une fin en soi, en photographie comme en spectrométrie. Le temps de mesure est imposé par le dispositif expérimental, par la nature de la source. Ce temps étant choisi, l'angle solide de l'objectif en découle par la condition qu'impose la plaque photographique utilisée : recevoir un nombre donné de photons par unité de surface pendant cette pose. En choisissant systématiquement le plus grand rapport d'ouverture de l'objectif on se limite à de faibles valeurs du rapport signal sur bruit. C'est par l'étude de ces variations du rapport signal sur bruit en fonction des paramètres B , U et T que le chapitre suivant nous fera ranger l'émulsion photographique dans la même catégorie de récepteurs que les photomultiplicateurs.



CHAPITRE II

NATURE DU BRUIT , CLASSIFICATION DU

RECEPTEUR PHOTOGRAPHIQUE

II - 1 - RAPPELS SUR LE SIGNAL:

La réponse d'une plaque photographique est une variation du coefficient de transmission de l'émulsion mesurée sur un densitomètre. On effectue souvent ces mesures en échelle logarithmique sur des densitomètres qui donnent la densité de l'émulsion par rapport à une densité référencé égale à 0 représentant la transmission de l'appareil en l'absence de plaque, ou quelquefois la transmission de l'émulsion non impressionnée.

$$D - D_0 = \log_{10} \frac{I_0}{I}$$

II - 1.1 LOI DE RECIPROCITE:

On constate expérimentalement qu'une émulsion développée dans des conditions bien définies offre une densité qui ne dépend que du produit

de l'éclairement par le temps de pose, parfois appelé l'umination. La densité d'une plaque ne dépend donc, pour une longueur d'onde déterminée, que du nombre de photons reçus par unité de surface de plaque pendant la pose. Cette loi cesse d'être vérifiée pour des temps de pose très courts (10^{-3} s) ou très longs (quelques heures) mais on cite des émulsions pour lesquelles elle reste vérifiée pour des temps de pose extrêmes dont le rapport est supérieur à 10^7 [16].

On traduit cette loi en disant que le récepteur photographique est sensible à l'éclairement, d'où la recherche fréquente pour un disperser donné, d'un objectif aussi ouvert que possible donnant l'éclairement maximum et le temps de pose minimum.

II - 1.2 CARACTERISTIQUE DE HURTER ET DRIFFIELD:

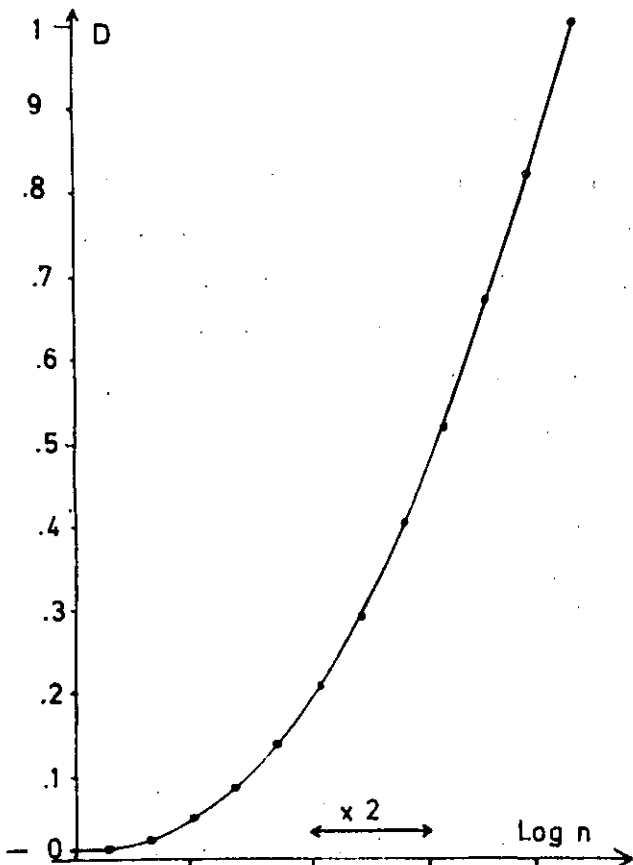


FIG II.1

CARACTERISTIQUE DE HURTER ET DRIFFIELD

Lorsqu'on reporte en coordonnées logarithmiques le coefficient de transmission de la plaque en fonction du produit éclairement - temps de pose, c'est-à-dire en fonction du nombre de photons reçus par unité de surface, on obtient toujours une courbe ayant l'allure de celle représentée par la figure II - 1.

Cette courbe, appelée caractéristique de HURTER et DRIFFIELD ou caractéristique H et D présente les particularités suivantes :

- 1) Existence d'un seuil au dessous duquel la densité reste.
- 2) Existence d'une partie quasi linéaire de pente
- 3) Existence d'une saturation.

La rapidité ou sensibilité de l'émulsion est caractérisée par la valeur du seuil. Elle est mesurée suivant des normes variées (DIN, ASA, ° SCHONER). La pente γ représente le contraste de l'émulsion.

II - 1.3 DETECTION DES SIGNAUX INFÉRIEURS AU SEUIL:

Si le nombre de photons reçus sur la plaque par unité de surface est inférieur à la valeur du seuil il n'y a pas de signal. On procède alors en ajoutant un éclaircissement constant dit de préexposition. En ajoutant ainsi N photons par cm^2 de plaque on atteint une région de la caractéristique de pente γ et si n photons par cm^2 constituent le signal la réponse est

$$\Delta D = \gamma \text{Log} \frac{N+n}{N} \approx \gamma \frac{n}{N} \quad \text{si } n \ll N \quad (5)$$

II - 2 - RAPPELS SUR LE BRUIT:

Lorsqu'on mesure la densité d'une plaque uniformément impressionnée à l'aide d'une fente de microdensitomètre explorant une surface S de plaque, on observe des fluctuations de cette densité D autour de sa valeur moyenne. On caractérise ces fluctuations par l'écart quadratique moyen δD des valeurs de D . La valeur de δD dépend de l'aire de la surface exploratrice et de la valeur moyenne de D .

II - 2.1 VARIATIONS DE δD AVEC S. LOI DE SELWYN:

Pour une densité donnée δD est proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la surface de plaque impressionnée. C'est la loi énoncée en 1935 par E.W.H. SELWYN [17] et vérifiée très souvent depuis [18][19].

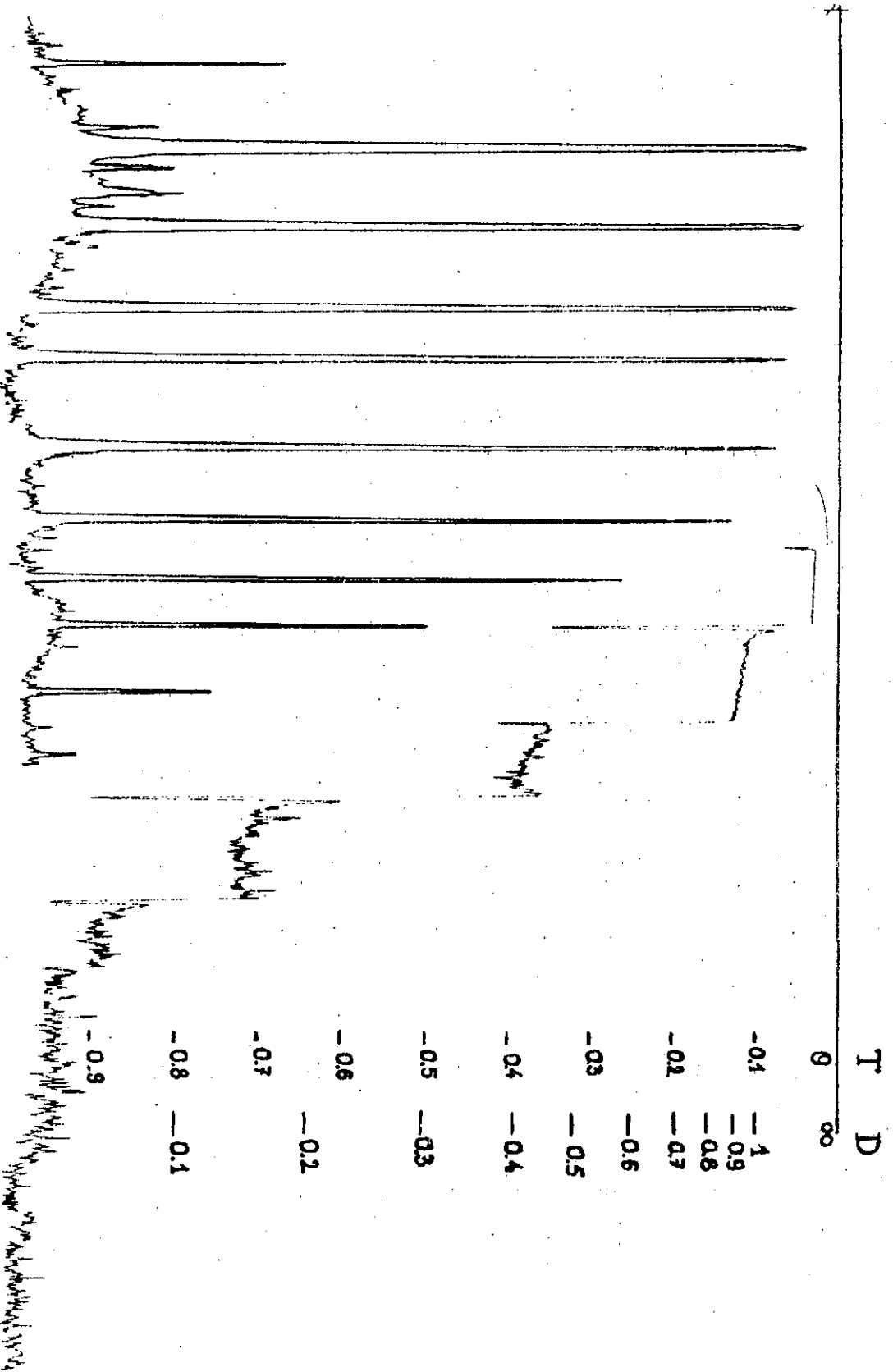


FIG II 2 IMAGES DE FENTES

On peut interpréter simplement ce résultat expérimental par un comptage des grains répartis aléatoirement dans l'émulsion. L'erreur sur le nombre n de grains comptés est égale à \sqrt{n} qui est proportionnel, pour une certaine densité, à \sqrt{S} . Le nombre n est toutefois inférieur au nombre des grains que révèle un examen microscopique de l'émulsion. En effet, la disposition des grains d'argent n'est pas parfaitement aléatoire et cette interdépendance entre les grains augmente les fluctuations macroscopiques de transmission qu'ils provoquent. On peut faire un parallèle avec les plaques de la caméra électronique pour lesquelles chaque électron incident donne une gerbe de grains d'argent et c'est le comptage de ces gerbes, et non des grains individuels qui détermine les fluctuations observées. De même les fluctuations de courant d'un photomultiplicateur ne s'interprètent pas par la statistique des électrons individuels du courant d'anode, mais par celle des gerbes d'électrons créées par chaque photoélectron émis par la photocathode.

II - 2.2 VARIATIONS DE δD EN FONCTION DE D:

On constate expérimentalement que les fluctuations D ne sont pas nulles au dessous du seuil, donc dans la région où le signal est nul. Elles augmentent tout d'abord avec la densité pour diminuer à nouveau dans la région des fortes densités. A la saturation l'amplitude des fluctuations est faible mais pas nulle.

II - 3 - RAPPEL SUR LA DEFINITION DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT:

La notion de rapport signal sur bruit n'est pas simple lorsqu'il s'agit du récepteur photographique. Sur un enregistrement tel que celui de la figure II - 2 une première faute dans la mesure de cette grandeur consiste à faire le rapport de la hauteur de la raie observée à la valeur de l'amplitude du bruit du fond non impressionné de la plaque. Ce sont les fluctuations observées à la densité D_1 de la raie qui sont à prendre en considération.

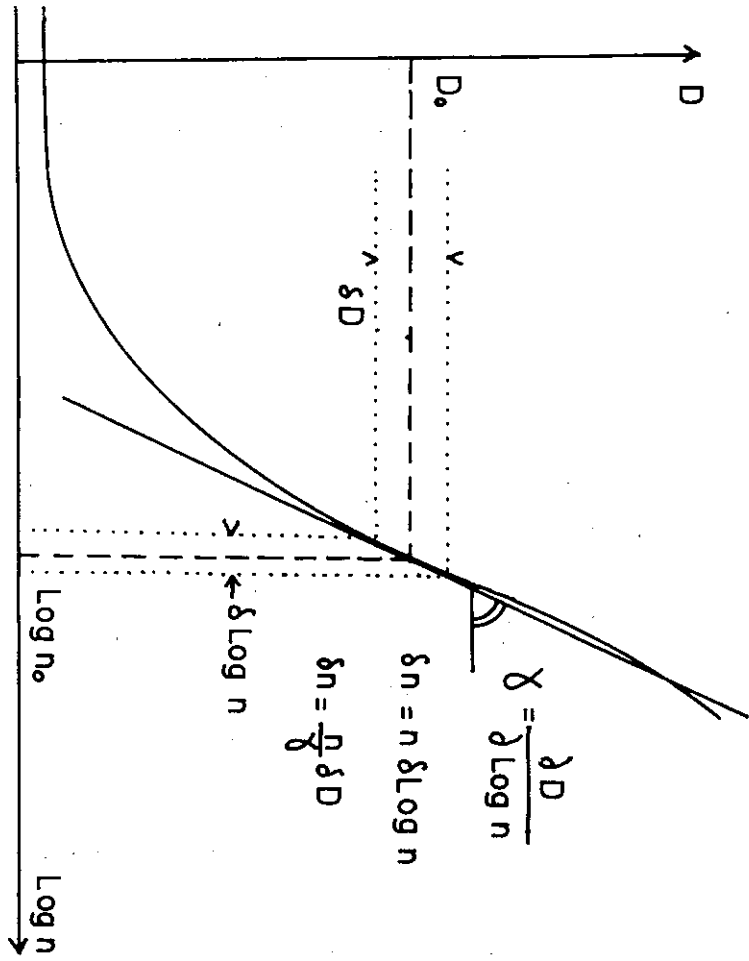


FIG II.3 Définition des paramètres intervenant dans l'expression du rapport signal sur bruit

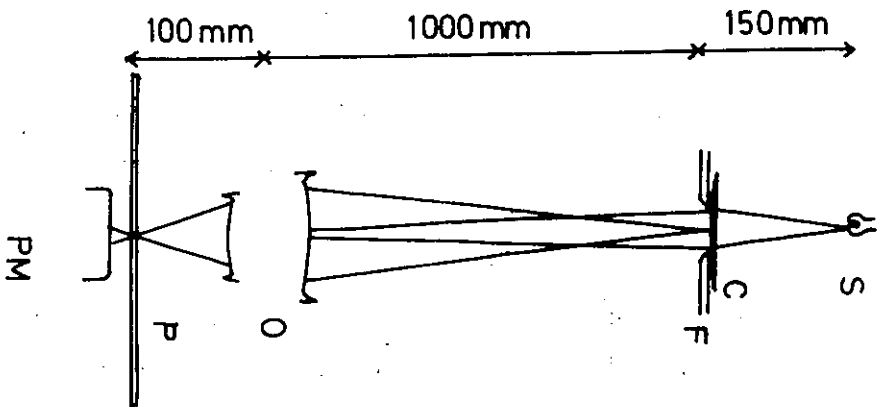


FIG II.4 Banc de mesure

Une deuxième faute consiste à effectuer le rapport $\frac{D_1 - D_0}{\delta D}$.
En effet la caractéristique H et D n'étant pas linéaire il faut tenir compte de la valeur de γ au point D_1 pour évaluer l'incertitude correspondante sur n_1 , nombre de photons reçus sur l'unité de surface de plaque pendant la pose. Si δD_1 représente l'incertitude sur la mesure de D_1 , l'incertitude obtenue sur n_1 est (cf. figure II.3) :

$$\delta n_1 = \frac{n_1 \cdot \delta D_1}{\gamma}$$

et le rapport signal sur bruit:

$$\frac{n_1}{\delta n_1} = \frac{\gamma}{\delta D_1} \quad (6)$$

Cette quantité s'annule au dessous du seuil et à la saturation puisque γ y est nul alors que les fluctuations δD ne le sont pas.

II - 4 - RAPPEL SUR LA DEFINITION DU RENDEMENT QUANTIQUE EQUIVALENT:

Introduite simultanément et indépendamment par R.C. JONES [13] et P.B. FELLGETT [20] en 1958, la notion de rendement quantique équivalent de la plaque photographique est une application de la généralisation exposée dans le paragraphe I - 2.2.

Si l'incertitude δD_1 du paragraphe précédent est obtenue pour une surface de plaque S, le nombre de photons utilisés pour cette lecture est $S \cdot n_1$. On peut donc définir le rendement quantique équivalent de la plaque pour cette mesure par :

$$Q = \left(\frac{\gamma}{\delta D_1} \right)^2 \frac{1}{S \cdot n_1} \quad (7)$$

L'intérêt de cette définition vient de la loi de Selwyn : puisque δD_1 est inversement proportionnel à \sqrt{S} cette valeur de Q ne dépend pas de S . C'est une caractéristique de la plaque pour cette densité. Les variations de Q en fonction de D qui résultent de l'observation des variations de δD en fonction de D sont caractérisées par l'existence d'un maximum entre deux valeurs nulles en dessous du seuil et au delà de la saturation où γ est nulle mais où existent toujours des fluctuations de densité.

II - 5 - ETUDE EXPERIMENTALE DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT ET DU RENDEMENT QUANTIQUE DE DIFFERENTES EMULSIONS:

Les études apparaissent de façon disparate dans la littérature avec des résultats souvent divergents. Nous pensons que parfois les auteurs désignent sous le même terme de rendement quantique des notions différentes, ce qui aboutit à des valeurs incompatibles [19] [20]. Nous insistons sur la définition physique du rendement quantique dans l'acception de R.C. JONES et de P.B. FELLGETT qui ne tient pas du tout compte des phénomènes à l'échelle microscopique. Il n'est pas contradictoire d'imaginer des mécanismes photochimiques utilisant 50% des photons incidents et de constater qu'après développement de l'image latente le rapport signal sur bruit est aussi mauvais que si l'on n'avait utilisé qu'un photon sur mille. Pour le spectroscopiste c'est cette dernière observation qui est importante. Dans le cadre d'un contrat passé entre le Laboratoire A. Cotton et la D.R.M.E nous avons fait systématiquement une étude comparative de quelques émulsions.

La méthode expérimentale est très simple : on établit une courbe caractéristique de Hurter et Driffield en mesurant pour chaque valeur de la densité les fluctuations de cette densité pour une surface de lecture donnée. Un banc de mesure spécial, servant à l'exposition des surfaces sensibles ainsi qu'à leur dépouillement est décrit sur la figure II - 4. Les mesures sont faites en lumière quasi monochromatique, la notion de rendement quantique n'étant définie que pour des photons d'énergie déterminée.

Nous avons en réalité fait des mesures de transmission, et non de densité, ce qui simplifie la chaîne de mesure, évite des erreurs dues aux coins de référence habituellement utilisés dans les densitomètres et ne présente guère d'inconvénient car, comme nous le verrons, le domaine intéressant se situe toujours dans la région des densités inférieures à 1 où la caractéristique Transmission-Log(éclairage × temps de pose) n'est guère plus linéaire que la caractéristique Log (éclairage × temps de pose) - Densité.

II - 5.1 EXPOSITION DES PLAQUES OU DES FILMS:

On place l'émulsion dans un champ d'éclairage uniforme (lampe quasi ponctuelle placée à 1 m, sans autre optique qu'un filtre interférentiel) et tout contre elle un échelon de gélatines absorbantes définissant onze zones d'éclairages en progression géométrique. Une douzième zone restée vierge permet une mesure de la transmission du fond de plaque ainsi qu'un contrôle des expositions accidentelles. La première zone exposée (n° 2) doit se trouver à peine au dessus du seuil. C'est pourquoi une première exposition est faite avec un échelon dont chaque marche a pour densité 0,3 et qui donne une vue d'ensemble de la caractéristique. Il permet d'ajuster le temps de pose pour un deuxième échelon de densité plus faible (0,1) qui détaille la partie intéressante de la caractéristique. C'est sur la plaque exposée avec ce deuxième échelon que sont faites les mesures.

II - 5.2 MESURE DE L'ECLAIREMENT:

Pour chacune des trois longueurs d'onde que nous avons utilisées (4400 Å, 5500 Å, 6600 Å) il faut connaître en valeur absolue (nombre de photons par unité de temps et de surface) l'éclairage donné par la source (lampe à incandescence alimentée par une tension stabilisée et filtre interférentiel). Les mesures sont toujours délicates; c'est la raison pour laquelle nous avons fait des évaluations indirectes par des mesures de rapport signal sur bruit obtenues avec un photomultiplicateur recevant le flux transmis dans le plan

dé la plaque par un trou de surface connue. Nous effectuons ainsi, plutôt qu'une mesure absolue du rendement quantique équivalent des émulsions une comparaison de ce rendement avec celui de la photocathode. La valeur de ce rendement pour la photocathode est donnée par le constructeur; elle est certainement beaucoup plus significative que le coefficient d'amplification de la chaîne de dynodes qui, pour une tension donnée, varie beaucoup d'un photomultiplicateur à l'autre.

Ces mesures de rapport signal sur bruit sont elles-mêmes difficiles. La loi

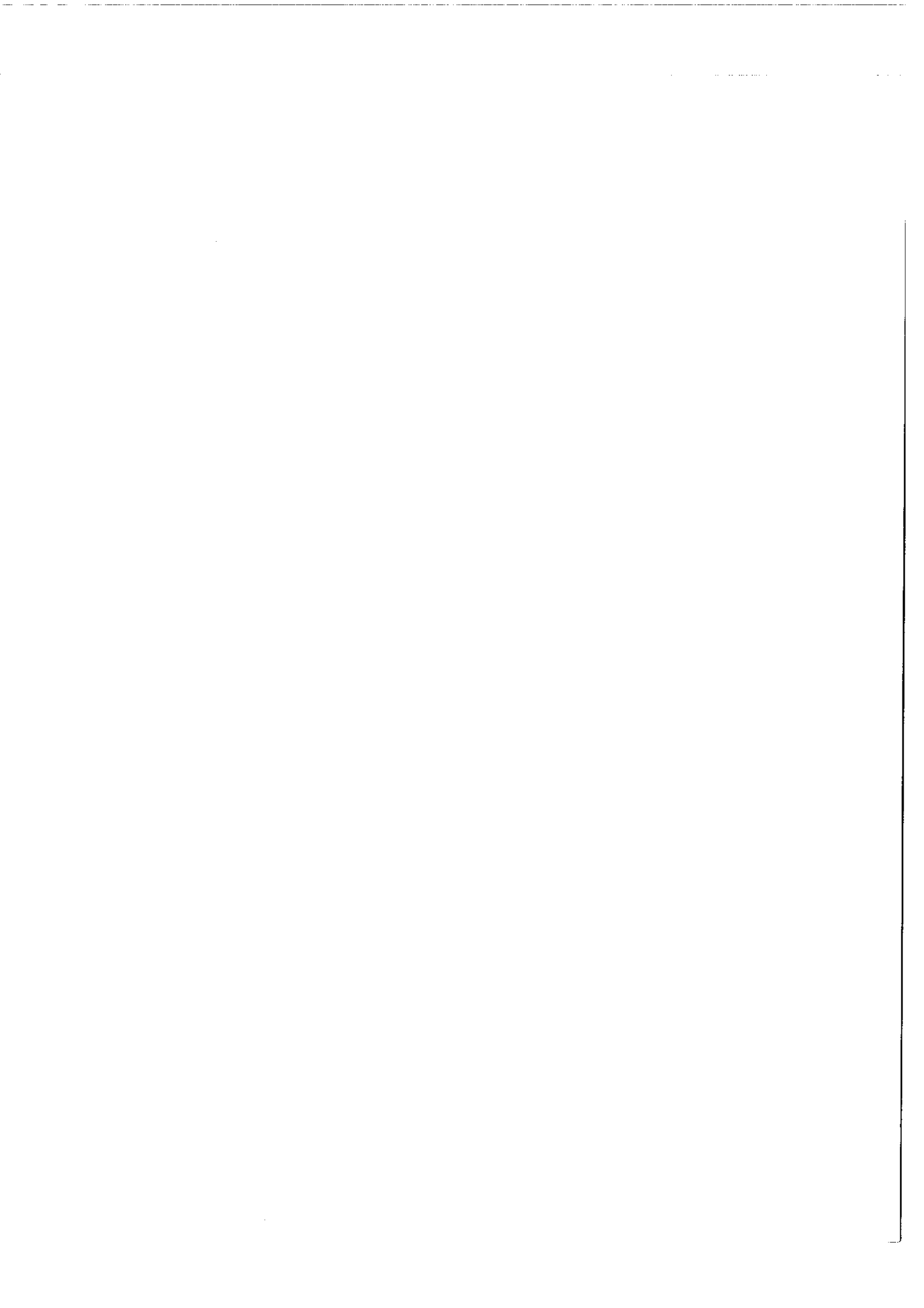
$$\rho = \sqrt{QN}$$

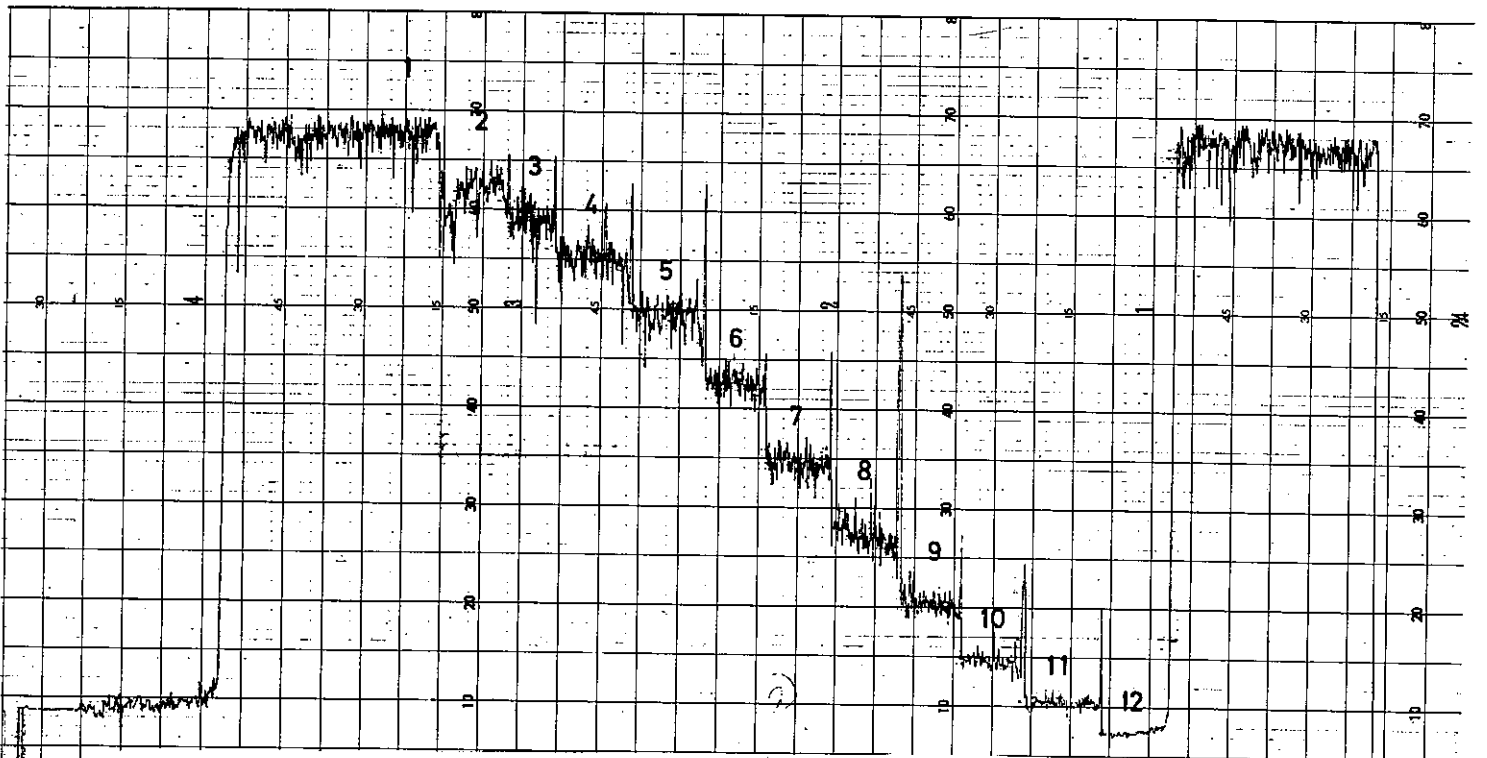
n'est valable que pour des valeurs suffisamment grandes de ρ (> 10). Une erreur de 10 % sur l'amplitude du bruit conduit à une erreur de l'ordre de 20 % sur N. La valeur de l'éclairement s'en déduit d'après la constante de temps de la chaîne de mesure.

Nous avons effectué des mesures avec un enregistreur pour lequel la constante de temps ne pouvait descendre à moins de quelques dixièmes de secondes, mais qui permettaient de bonnes mesures d'amplitude du bruit. Nous avons également fait des mesures sur un écran d'oscilloscope qui permet d'explorer une gamme importante de constantes de temps, mais pour lequel les précisions sur les mesures d'amplitude sont beaucoup moins bonnes. Des mesures indépendantes nous ont permis de penser que l'éclairement avait été déterminé avec une erreur comprise entre + 100 % et - 50 %. Cette précision n'est bien sûr pas excellente mais les divergences obtenues par les différents auteurs sur les valeurs de Q sont d'un ordre de grandeur tellement plus grand qu'il nous paraît inutile, pour l'instant, de l'améliorer.

II - 5.3 DEPOUILLEMENT ET RESULTATS:

On obtient la transmission de l'émulsion pour 12 valeurs de la lamination en progression géométrique qui permet de tracer la courbe





TEMPS DE POSE 120 SECONDES
PANCHRO 66 12 NO 1

LONGUEUR D ONDE 4400 ANGSTROMS
SURFACE LUE 2500 MICRONS CARRES

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E(I)	0.19E 03	0.25E 03	0.32E 03	0.42E 03	0.54E 03	0.70E 03	0.91E 03	0.12E C4	0.15E C4	0.20E 04	0.26E 04	0.34E 04
T(I)	1.000	0.966	0.932	0.887	0.825	0.740	0.695	0.520	0.418	0.322	0.243	0.175
DT(I)	0.023	0.025	0.028	0.029	0.030	0.029	0.028	0.025	0.023	0.020	0.018	0.016
D(I)	0.0	0.015	0.030	0.052	0.084	0.131	0.158	0.284	0.378	0.492	0.614	0.756
SB(I)	0.0	5.101	5.466	6.990	9.385	8.462	15.226	20.831	16.739	16.473	15.543	14.613
Q(I)	0.0	0.42E-04	0.37E-04	0.47E-04	0.65E-04	0.41E-04	0.10E-03	0.15E-C3	0.73E-04	0.54E-04	0.37E-04	0.25E-04

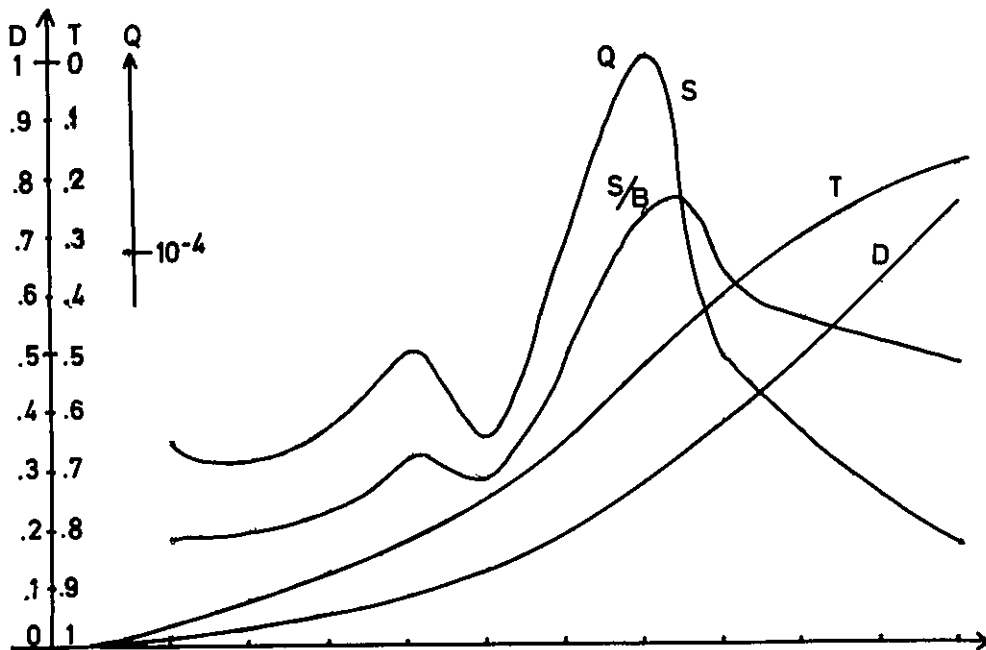


FIG II 5 EXEMPLE DE RESULTATS

$\mathcal{E} = f(\text{Log}(E \times T))$. La zone n° 1 se trouve en réalité en dehors de ce diagramme ($E \times T = 0$) mais la densité de la plaque vierge est la même que celle de toute plage située au dessous du seuil ; c'est le cas de la plage n° 1 portée sur l'enregistrement de la figure II.

Pour un nombre de photons n reçus pendant la pose par unité de surface de la plaque le rapport signal sur bruit obtenu sur la mesure de n est

$$\frac{n}{\delta n} = \frac{1}{\delta \mathcal{E}} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \text{Log } n}$$

déduite de (6) en remplaçant D par \mathcal{E}

Le rendement quantique équivalent, si les fluctuations ont été obtenues par une surface de lecture S est d'après (7)

$$Q = \frac{1}{\delta \mathcal{E}^2} \left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \text{Log } n} \right)^2 \frac{1}{S \cdot n}$$

Le calcul de $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \text{Log } n}$, de $\frac{n}{\delta n}$ et de Q est fait sur ordinateur, ce qui limite pour chaque plaque les opérations au relevé de douze valeurs de \mathcal{E} , douze valeurs de $\delta \mathcal{E}$ et des données caractéristiques de la mesure : temps de pose, surface de dépouillement, longueur d'onde excitatrice type de plaque et traitement.

Un enregistrement typique est donné sur la figure II -5 et les résultats d'un certain nombre de mesures tels qu'ils sont délivrés par l'UNIVAC 1108 d'ORSAY par le tableau.

On voit sur ces résultats que Q reste faible et ceci bien souvent en contradiction avec d'autres publications [21] [22]. Ces dernières nous semblent malgré tout très optimistes sur cette valeur de Q des récepteurs photographiques qui leur donnerait, avec leur caractère multicanal, un avantage important sur les meilleurs récepteurs photométriques.

L'existence d'un maximum étroit de Q montre la nécessité de respecter un temps d'exposition précis et l'impossibilité pour le récepteur de rendre en une seule pose des signaux corrects pour des éléments d'intensité différentes. La dynamique de ce récepteur est très faible, beaucoup plus faible encore que ne le laisse penser la forme générale de la caractéristique, car c'est déjà bien avant d'atteindre la partie linéaire de la caractéristique de Hurter et Driffield que le rendement quantique tombe à des valeurs catastrophiquement basses.

II - 6 - LOIS DE VARIATION DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT POUR LE RECEPTEUR PHOTOGRAPHIQUE:

Pour avoir des notations homogènes avec le chapitre I - 2 nous modifions ainsi celles des paragraphes précédents :

Nous appelons b_1 l'incertitude obtenue sur la densité D_1 d'une plaque lue sur une surface unité et k_1 la valeur de la dérivée $\frac{\partial D}{\partial n}$ au point de densité D_1 . n_1 est le nombre de photons reçus par l'unité de surface de plaque pendant la pose qui a conduit à la densité D_1 .

L'erreur δn commise sur n est $\delta n = \frac{k_1}{b_1}$ et le rapport signal sur bruit

$$\rho = \frac{n}{\delta n} = \frac{k_1 n_1}{b_1}$$

Si nous effectuons à cette même densité une mesure sur une surface S de plaque le nombre de photons utilisés est : $N = n S$

L'incertitude sur D est $\delta D = \frac{b_1}{\sqrt{S}}$ et l'incertitude sur N est $\delta N = S \cdot \delta n = \frac{b_1 \sqrt{S}}{k_1}$ d'où le rapport signal sur bruit :

$$\rho = \frac{k_1}{b_1} n_1 \sqrt{S} = \frac{k_1}{b_1} N \frac{1}{\sqrt{S}} \quad (8)$$

La valeur de Q tirée de l'une ou de l'autre de ces expressions de ρ d'après (7) est

$$Q_1 = \frac{k_1^2}{b_1^2} n_1 = \frac{k_1^2}{b_1^2} \frac{N}{S} \quad (9)$$

II - 6.1 SIGNAL D'INTENSITE SUFFISANTE:

Si on dispose de lumière en suffisance on choisira le temps de pose pour donner à N une valeur N_0 correspondant à la densité D_0 pour laquelle la valeur de Q est maximale. On peut, comme l'a fait remarquer P. FELLGETT prolonger le temps de pose jusqu'à une densité qui donne le maximum du produit $Q \times n$. Les photons excédentaires seront moins bien utilisés mais le rapport signal sur bruit s'améliorera (On ne doit en aucun cas prolonger au delà de cette valeur le temps de pose car tout photon supplémentaire détériorera l'information présente dans l'image latente). Cette deuxième manière d'opérer est à choisir lorsque c'est la plaque elle-même qui limite la capacité d'information de la chaîne de mesure. Sinon il est préférable de s'en tenir à la densité D_0 et s'il y a possibilité de prolonger le temps de pose on le fera en augmentant la surface d'émulsion impressionnée.

Dans ce cas, les expressions du rapport signal sur bruit et du rendement quantique sont :

$$P = \frac{k_0}{b_0} \frac{N}{\sqrt{S}} \quad Q_0 = \frac{k_0^2}{b_0^2} \frac{N}{S}$$

d'où :

$$P = \sqrt{Q_0 N}$$

et d'après

$$N = B \cdot U \cdot T$$

$$P = \sqrt{Q_0 \times B \times U \cdot T} \quad (1)$$

Cette expression est en tous points identique à celle établie dans le chapitre I.2.1 pour un photomultiplicateur. Toutefois il faut remarquer que dans ce cas l'expérimentateur ne peut changer B, U ou T sans précaution. Il faut en effet pour garder la valeur Q_0 restreindre une densité D_0 , donc une valeur déterminée de n_0 . Si Ω désigne l'angle solide du faisceau au niveau de la plaque

$$n_0 = \frac{B U T}{S} = B \cdot \Omega \cdot T \quad (10)$$

A luminance de source donnée, l'angle solide Ω doit être inversement proportionnel au temps de pose. C'est ainsi qu'à flux donné, un appareil très ouvert impose un temps de pose plus court qui conduira d'après (1) à un rapport signal sur bruit moins bon. Cette ouverture du faisceau de sortie ne peut donc pas être considérée comme un critère de luminosité bien que donnant, à flux donné, un éclaircissement plus élevé. Ω joue le même rôle que la constante de temps associée à un photomultiplicateur. Un spectromètre n'est pas considéré comme plus lumineux parce que sa constante de temps permet un balayage plus rapide.

II - 6.2 CAS DES SIGNAUX FAIBLES:

Il se peut que la densité D_0 ne puisse être atteinte, c'est-à-dire qu'on ne puisse respecter la condition (8) dans le cas de certaines sources très peu brillantes, ou dans certains cas où T est strictement limité. Deux causes conjuguent alors leurs effets pour amoindrir le rapport signal sur bruit :

- a) le nombre total de photons disponibles est faible.
- b) le rendement quantique équivalent Q de la plaque est très faible car l'exposition n'a donné qu'une densité très inférieure à D_0 . On ne peut rien à la première cause, mais la valeur de Q peut être améliorée par la technique bien connue de la préexposition. Elle consiste

à superposer au signal un éclairage homogène pendant un temps tel que la plaque reçoive m photons par unité de surface lui permettant d'atteindre une densité pour laquelle le rendement quantique ait une valeur plus acceptable. Le rapport signal sur bruit maximum ne sera plus obtenu cette fois pour $D = D_0$ car le flux de préexposition apporte un bruit parasite et il faut doser m pour obtenir une densité D' plus faible que D_0 .

Soit S la surface de plaque exposée au signal

$$n = \frac{B.U.T}{S}$$

le signal est $N = B U T = nS$

$$\text{le bruit est } \delta[(n+m)S] = \delta(N+M) = \frac{b'}{k'}\sqrt{S}$$

b' et k' sont les valeurs des paramètres précédemment définis pour la densité D' atteinte par l'exposition $n+m$

$$\rho = \frac{k'}{b'} n\sqrt{S} = \frac{k'}{b'} \frac{N}{\sqrt{S}} \quad (18)$$

et d'après (9) et (10) en supposant $n \gg m$

$$\rho = B U T \sqrt{\frac{Q'}{m S}}$$

m doit être choisi pour rendre le rapport $\frac{Q}{m}$ maximum.

$$m = m' \text{ défini par } \left(\frac{\partial Q}{\partial m} \right)_{m=m'} = \frac{Q'}{m'} \quad (11)$$

Si nous choisissons ainsi m' et à condition que $n \ll m'$

$$p = B.U.T \sqrt{\frac{Q'}{mS}} = B.T \sqrt{\frac{Q'}{m'} . U . \Omega} \quad (12)$$

L'expression (12) fait apparaître pour la première fois une proportionnalité du rapport signal sur bruit au temps de mesure.

Ceci est une caractéristique très particulière à cette méthode d'utilisation du récepteur photographique. Nous retrouvons pour les autres paramètres une loi de variation analogue à celle de l'expression (4) obtenue pour les récepteurs à bruit interne. La valeur de l'angle solide joue maintenant un rôle dans la valeur du rapport signal sur bruit obtenu pour un flux et un temps de pose donnés.

Il ne faut pas perdre de vue que cette manière d'opérer n'est qu'un pis aller. Si le rendement quantique équivalent de la plaque est Q' , ce rendement n'est obtenu que par addition d'un grand nombre de photons parasites. Le rapport signal sur bruit obtenu en fin de compte est celui qu'aurait donné un récepteur sans bruit dont le rendement quantique serait :

$$Q = \frac{N}{(\delta N)^2} = \frac{b'^2}{R'^2} \frac{n}{m^2} \approx \frac{n}{m} Q' \quad n \ll m$$

Cette méthode est donc très défavorable. C'est elle qu'a discutée R.C. JONES dans sa classification des détecteurs fondée sur la notion de détectivité. Cette notion qui fait appel au plus petit flux détectable impose l'emploi de la préexposition. La conclusion de ce résultat est que le récepteur photographique n'est pas adapté à la détection des faibles quantités de lumière.

II - 7 - CONCLUSION:

II - 7.1 CLASSIFICATION DU RECEPTEUR PHOTOGRAPHIQUE:

L'expression (10) montre que la plaque photographique se comporte comme un récepteur quantique sans bruit propre. La grandeur photo -

métrique fondamentale qui caractérise le rapport signal sur bruit est, comme pour un photomultiplicateur le produit du flux par le temps de pose. Ce résultat est masqué dans la pratique parce qu'il n'est obtenu que dans des conditions bien précises de lustration. Le domaine d'utilisation correcte de ce récepteur est étroit : la plaque doit pour avoir son efficacité maximale travailler au voisinage d'un niveau déterminé.

II - 7.2 CONSEQUENCES POUR UN CRITERE DE LUMINOSITE:

Il en résulte qu'on doit remplacer le critère de luminosité habituellement choisi pour un appareil photographique, c'est-à-dire le rapport d'ouverture de l'objectif (dont dépend, à lustrance de source donnée l'éclairage de la plaque) par un critère plus significatif d'efficacité qui, comme pour un spectromètre, est la section de cet objectif (dont dépend le flux transmis en un temps donné). Un appareil doté d'un objectif de grande ouverture, c'est-à-dire à surface donnée d'une courte distance focale, est un appareil plus rapide, mais non plus lumineux au sens du rapport signal sur bruit obtenu d'une source donnée en un temps donné.

Une autre conséquence de ce résultat est l'inadaptation des méthodes du type multiplex ou à modulation d'amplitude, pour lesquels on gagne en flux disponible au prix d'une superposition sur le récepteur des photons provenant d'éléments spectraux différents. Comme dans le cas des récepteurs sensibles au bruit de photons, ce gain de flux aura comme contrepartie l'augmentation du bruit par ces éléments parasites. Une discussion plus détaillée de ces dispositifs sera faite au chapitre IV.

II - 7.3 CONDITIONS D'UTILISATION DU RECEPTEUR PHOTOGRAPHIQUE:

Ces conditions ont été clairement exposées par P.B. FELLGETT [23]. Elles dépendent du problème étudié : si la qualité de la mesure est limitée par le nombre total de photons disponibles, il importe de les

utiliser au mieux en calculant les paramètres géométriques du montage pour que la densité finalement atteinte soit celle D_0 pour laquelle le rendement quantique équivalent de l'émulsion est maximal.

Si la source émet en quantité illimitée on peut prolonger la pose jusqu'à la densité D_1 qui permet d'extraire d'une surface de plaque donnée le maximum de rapport signal sur bruit. Les photons ainsi ajoutés sont moins bien utilisés mais ils contribuent à améliorer la qualité de la mesure. Tout dépassement de cette densité est à proscrire car les photons supplémentaires, non seulement n'apporteraient aucune information, mais détruiraient l'information présente.

Enfin si la quantité de lumière disponible est insuffisante on peut utiliser la préexposition mais dans ce cas on ne doit pas oublier que la technique photographique est sérieusement handicapée par une très faible valeur du rendement quantique équivalent réellement obtenu. La densité à respecter est cette fois $D' < D_0$.

La mise en évidence de ces trois densités caractéristiques nous parait très importante et devrait être d'une très grande utilité pour les expérimentateurs. Ces densités dépendent malheureusement des conditions de traitement au cours du développement. Toutefois il semble qu'un ordre de grandeur valable pour des conditions moyennes devrait pouvoir être donné par le fabricant.

CHAPITRE III

APPLICATION AUX SPECTROGRAPHES A FENTES

III - 1 - LUMINOSITE DES SPECTROGRAPHES - La loi $\mathcal{L} \times R^2 = \text{CSTE}$:

Soit un disperser, par exemple un réseau. S'il travaille loin de son pouvoir de résolution théorique et si on admet une hauteur angulaire β fixée pour la fente d'entrée l'étendue de faisceau disponible ne dépend que du pouvoir de résolution effectif et lui est inversement proportionnelle. Il en est de même du flux pour une source monochromatique de brillance donnée.

La réponse de la plaque est déterminée par le produit éclairé-ment \times temps de pose. C'est pourquoi on est tenté, pour obtenir une certaine densité en un minimum de temps, de concentrer le flux précédemment défini sur la plus petite surface de plaque possible. Celle-ci est imposée par la limite de résolution spatiale \mathcal{E} de la plaque, un élément spectral ne pouvant avoir une largeur inférieure à \mathcal{E} .

On est ainsi conduit à choisir pour un pouvoir de résolution donné une distance focale adaptée de l'objectif de sortie telle que la largeur linéaire soit égal à \mathcal{E} , c'est-à-dire une distance focale F proportionnelle

au pouvoir de résolution cherché. La hauteur $\beta \times F$ de l'image de la fente d'entrée est donc proportionnelle à R, donc la surface $\mathcal{E} \beta F$ de plaque consacrée à un élément spectral est proportionnelle à R. Comme le flux transmis par le disperseur dans le cas de raies monochromatiques est proportionnel à $\frac{1}{R}$ l'éclairement obtenu dans le plan de la plaque est proportionnel à $\frac{1}{R^2}$. Si on caractérise la luminosité d'un spectrographe par l'éclairement R^2 obtenu dans le plan de la plaque en cherchant pour chaque résolution l'éclairement maximum compatible avec la limite de résolution spatiale de l'émulsion on aboutit donc à la loi :

$$\mathcal{L} \times R^2 = \text{cste}$$

Les conditions précisées ci-dessus ont malgré tout un inconvénient : elles attribuent à un élément spectral une surface de plaque proportionnelle à R. Cela signifie qu'on obtiendra à densité de plaque donnée un rapport signal sur bruit d'autant meilleur que le pouvoir de résolution sera plus élevé.

III - 2 ETUDE DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT ; COMPARAISON AUX SPECTROMETRES:

III - 2.1 SPECTROMETRES:

Nous rappelons ici comment varie le rapport signal sur bruit obtenu dans la mesure de l'intensité d'un élément spectral par un spectromètre à balayage séquentiel fonctionnant très au dessous de son pouvoir de résolution théorique. Il faut ici préciser le domaine spectral étudié puisque le temps consacré à l'étude d'un élément spectral est égal au temps total de la mesure T divisé par le nombre d'éléments spectraux

$M = \frac{\Delta\sigma}{\delta\sigma}$. Il est logique de faire une telle étude à largeur de domaine spectral étudié $\Delta\sigma$ constante. Deux cas sont à distinguer suivant la nature du récepteur.

III - 2.1.1. Le récepteur est un photomultiplicateur parfait sans bruit propre. Le bruit ne vient que du flux transmis par le spectromètre. Le rapport signal sur bruit est égal à \sqrt{QN} ou N est le nombre de photons reçus sur le récepteur par élément spectral.

a - Source monochromatique:

$$N = N_0 \frac{T}{T_0} \frac{M_0}{M} \frac{R_0}{R} \quad \text{or} \quad \frac{M_0}{M} = \frac{R_0}{R}$$

d'où

$$N = N_0 \frac{T}{T_0} \frac{R_0^2}{R^2}$$

c'est-à-dire :

$$\rho = \rho_0 \frac{R_0}{\sqrt{T_0}} \frac{\sqrt{T}}{R}$$

b - Source continue:

$$N = N_0 \frac{T}{T_0} \frac{M_0}{M} \frac{R_0^2}{R^2}$$

d'où

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{R_0^3}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

III - 2.1.2. BRUIT DU RECEPTEUR: Le récepteur présente un bruit propre qui rend négligeable le bruit lié au flux mesuré. Le rapport signal sur bruit est alors (cf: par.I - 2.3) proportionnel au flux incident et à la racine carrée du temps pendant lequel ce flux est enregistré.

a - CAS MONOCHROMATIQUE :

$$\rho = \rho_0 \frac{\bar{\Phi}}{\Phi_0} \sqrt{\frac{R_0}{R}} \sqrt{\frac{T}{T_0}} = \rho_0 \left(\frac{R_0^3}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

b - CAS CONTINU :

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{R_0^5}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T}{R^5} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Nous supposons dans les deux expressions précédentes que le bruit du récepteur est indépendant de R, ce qui peut ne pas être exact. En effet l'étendue de faisceau délivrée par le spectromètre est proportionnelle à $\frac{1}{R}$ ce qui permet de faire varier les dimensions du récepteur. Or, pour un flux donné certains récepteurs possédant un bruit propre donnent un rapport signal sur bruit inversement proportionnel à la racine carrée de leur surface sensible. Toutefois, l'étendue délivrée par un spectromètre à fentes est tellement faible que bien souvent il n'est pas possible de réduire les dimensions du récepteur au dessous de limites correspondant à un pouvoir de résolution extrêmement bas si bien que l'adaptation étant impossible on garde le même récepteur avec un bruit constant quel que soit le pouvoir de résolution.

III - 2.2 SPECTROGRAPHE:

Nous n'allons plus maintenant exiger que la distance focale de sortie ait la valeur minimum permise par la limite de résolution spatiale de l'émulsion. Au contraire, nous allons supposer qu'elle est nettement supérieure à cette valeur, c'est-à-dire que la largeur d'un élément spectral est beaucoup plus grande que ξ . Il suffit alors pour changer de résolution d'ouvrir ou de fermer la fente d'entrée.

III - 2.2.1 CAS MONOCHROMATIQUE: Pour une distance focale donnée la surface de plaque consacrée à un élément spectral est proportionnelle à l'inverse du pouvoir de résolution et à résolution donnée cette surface est proportionnelle au carré de la distance focale. Le temps de pose nécessaire à l'obtention d'une densité donnée est proportionnel à l'inverse de l'éclairement obtenu dans le plan de la plaque.

$$\rho = \rho_0 \sqrt{\frac{S}{S_0}} = \rho_0 \frac{F}{F_0} \sqrt{\frac{R_0}{R}}$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{F^2}{F_0^2} \quad \text{d'où} \quad P = P_0 \frac{R_0}{T_0} \frac{T}{R}$$

III - 2.2.2 CAS CONTINU : Les mêmes conclusions sont valables avec cette fois un flux transmis proportionnel à $1/R^2$

$$P = P_0 \frac{F}{F_0} \frac{R_0}{R}$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{F^2}{F_0^2} \frac{R_0}{R} \quad P = P_0 \sqrt{\frac{R_0}{T_0}} \frac{\sqrt{T}}{R}$$

Le tableau III-A compare les résultats précédents en mettant à part dans le cas du spectrographe le facteur R représentant le gain en rapport signal sur bruit, apporté par le caractère multicanal de la plaque. On voit que la loi de variation du rapport signal sur bruit en fonction du pouvoir de résolution R et du temps total T consacré à l'étude d'un intervalle spectral déterminé est la même pour un spectrographe et pour un spectromètre équipé d'un photomultiplicateur.

CAS	SPECTROGRAPHE	SPECTROMÈTRE	
		BRUIT DE PHOTONS	BRUIT DE RECEPTEUR
MONOCHROMATIQUE	$P = P_0 \sqrt{\frac{R_0}{T_0}} \frac{\sqrt{T}}{R} \sqrt{R}$	$P = P_0 \sqrt{\frac{R_0}{T_0}} \frac{\sqrt{T}}{R}$	$P = P_0 \sqrt{\frac{R_0^3}{T_0}} \sqrt{\frac{T}{R^3}}$
CONTINU	$P = P_0 \frac{R_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{T}{R^3}} \sqrt{R}$	$P = P_0 \sqrt{\frac{R_0^3}{T_0}} \sqrt{\frac{T}{R^3}}$	$P = P_0 \sqrt{\frac{R_0^5}{T_0}} \sqrt{\frac{T}{R^5}}$

TABLEAU III-A

III - 3 FACTEUR DE MERITE D'UN SPECTROGRAPHE.

III - 3.1 ETABLISSEMENT DU FACTEUR DE MERITE.

Reprenons la formule donnant en fonction de R et T la valeur du rapport signal sur bruit donné par un spectrographe dans le cas monochromatique :

$$\rho^2 = \rho_o^2 \frac{R_o}{T_o} \frac{T}{R}$$

Nous pouvons faire apparaître un invariant caractéristique de l'ensemble spectrographe-source

$$\frac{R \rho^2}{T} = r R \rho_o^2 = \rho_o^2 \frac{R_o}{T_o}$$

où $r = \frac{1}{T}$ est la rapidité de la mesure. Pour mettre en évidence les facteurs qui ne dépendent que de l'appareil nous explicitons le rapport R_o/T_o . Nous savons que pour un spectromètre ou un spectrographe à fentes le produit $U \times R$ de l'étendue de faisceau par le pouvoir de résolution est un invariant, soit $U \times R = A$. La plaque photographique doit au cours de la pose de durée T_o recevoir n_o photons par unité de surface

$$n_o = \frac{B \times U \times T_o \times \tau}{s_o} = \frac{B \times A \times T_o \times \tau}{s_o \times R_o}$$

donc
$$\frac{R_o}{T_o} = \frac{B \times A \times \tau}{n_o \times s_o}$$

$$r \times R \times \rho^2 = \left(\frac{\rho_o^2}{n_o \times s_o} \right) \times (B) \times (A \times \tau)$$

Dans l'expression de l'invariant $r \times R \times \rho^2$ nous trouvons trois termes dont l'un ne dépend que de la plaque (et qui n'est autre que son rendement quantique équivalent Q_o) le second ne dépend que de la source et le dernier, caractéristique du spectrographe n'est autre que l'invariant A du

disperseur éventuellement multiplié par un coefficient de transmission τ .

Lorsqu'on cherche à définir les qualités d'un spectrographe par la valeur du rapport signal sur bruit obtenu à résolution et temps de mesure donnés, on trouve le même facteur de mérite que pour un spectromètre: c'est un facteur de mérite du disperseur lui-même.

III - 3.2 OUVERTURE ET RAPIDITE:

En spectrométrie il est simple de faire varier le temps d'étude d'un spectre à l'autre. Il suffit de changer conjointement la constante de temps du photomultiplicateur et la vitesse de défilement du spectre. D'autre part on n'est limité vers les temps courts que par la valeur du rapport signal sur bruit, obtenu.

En spectrographie c'est au contraire une opération malcommode qui ne peut se faire à émulsion donnée que par changement de l'objectif de chambre. La distance focale de cet objectif déterminera l'angle solide du faisceau au niveau de la plaque et d'après (10) le temps de pose. Une modification en plus ou en moins du temps de pose qui ne s'accompagnerait pas d'une modification adéquate des caractéristiques de l'objectif conduirait à une perte catastrophique en rapport signal sur bruit. Le chapitre II - 5. nous a montré qu'une diminution dans un rapport ρ du temps de pose peut conduire à une réduction du rapport signal sur bruit par un facteur supérieur à la valeur 1,4 attendue d'après (1).

D'autre part nous n'avons plus la libre disposition des valeurs inférieures de ρ et du temps de mesure. En effet on doit maintenir dans le plan de la plaque la largeur d'un élément spectral au moins égale à la limite de résolution spatiale de l'émulsion. A disperseur et résolution donnés il existe une distance focale minimale à laquelle sont liés un angle solide Ω maximal et un temps de pose minimal. Comme ce temps de pose est limité par ailleurs aux valeurs supérieures par des considérations pratiques (stabilité des appareils, écarts à la loi de réciprocité, durée raisonnable des

expériences) on peut rassembler sur un schéma (fig. III.1) les limites de variations de Ω , ρ et T pour un disperseur et une résolution données en fonction de la distance focale de l'objectif. Il apparait ainsi pour certaines sources ne délivrant que peu de photons une limitation fondamentale pour un disperseur donné lorsque $F_m = FM$. On remarque que ce cas se présente souvent dans la pratique : pour une source donnée et un disperseur donné on choisit en réalité une résolution telle que $F_m = FM = F$. C'est pourquoi on est contraint dans ces conditions d'obtenir un rapport signal sur bruit proportionnel à R et de respecter un temps de pose proportionnel à R^2 .

III - 3.3 NOMBRE D'ELEMENTS SPECTRAUX ETUDIABLES:

Si S est la surface totale de la plaque le nombre d'éléments spectraux étudiés est au maximum $M_m = \frac{S}{s}$, s étant la surface consacrée à un élément spectral.

$$s = s_0 \frac{\rho^2}{\rho_0^2} \quad M \rho^2 \leq \frac{s \rho_0^2}{s_0}$$

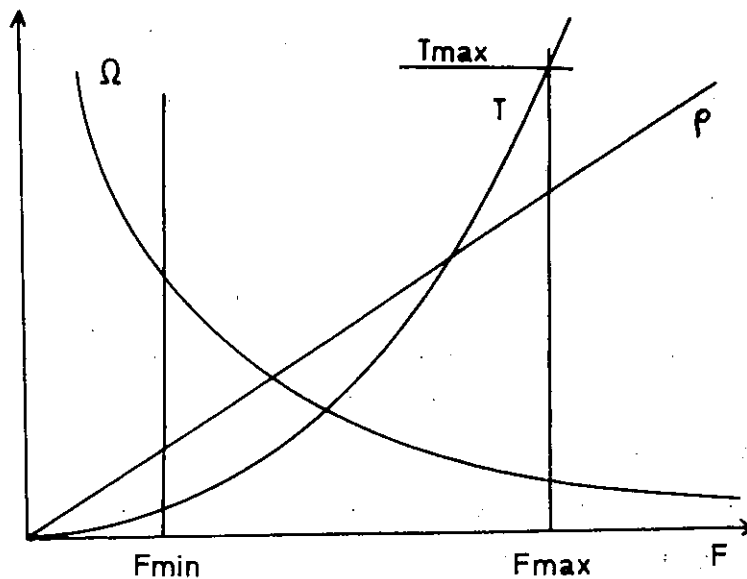
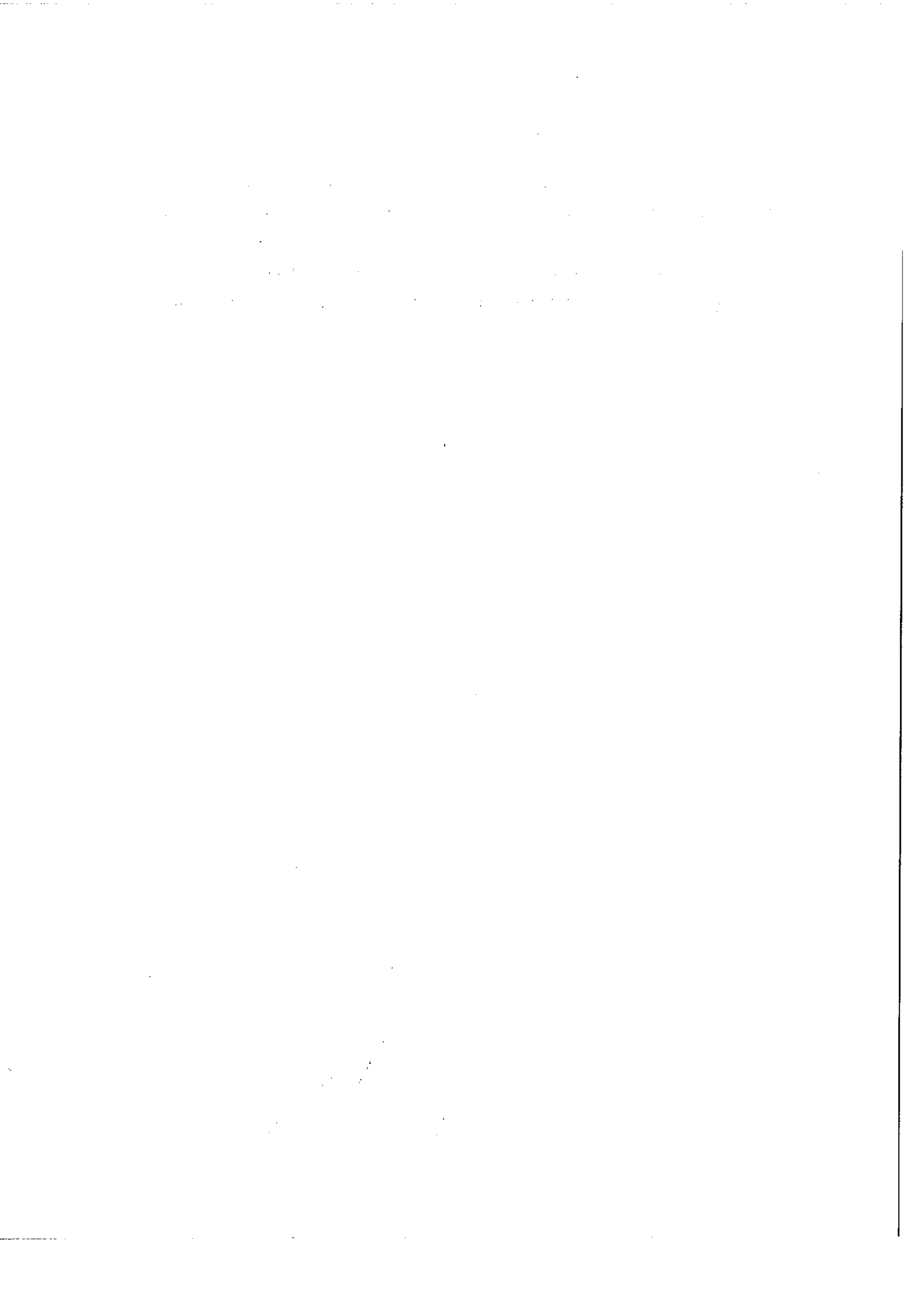


FIG III.1 Lois de variation de Ω, ρ et T en fonction de F pour un disperseur donné (R fixé)

Une valeur élevée de M est une justification essentielle de l'utilisation des spectrographes. La surface S réellement utilisable est donc un important facteur de mérite de l'appareil que l'on peut répartir sur M ou sur ρ . Ceci montre que le champ angulaire d'un objectif photographique est une qualité fondamentale pour le spectrographe qu'il équipe.



CHAPITRE IV

APPLICATION A D'AUTRES METHODES

SPECTROGRAPHIQUES

IV - 1 - SPECTROGRAPHIE PAR GRILLE:

IV - 1.1 RAPPELS SUR LE SPECTROMETRE A GRILLE DE GIRARD:

A la place de la fente d'entrée d'un spectromètre classique à réseau on met une grille, constituée par des zones opaques et des zones transparentes juxtaposées de formes variables. Un modèle classique est la grille hyperbolique pour laquelle les zones opaques et les zones transparentes sont délimitées par des hyperboles équilatères dont on peut écrire les équations sous la forme

$$xy = n a^2$$

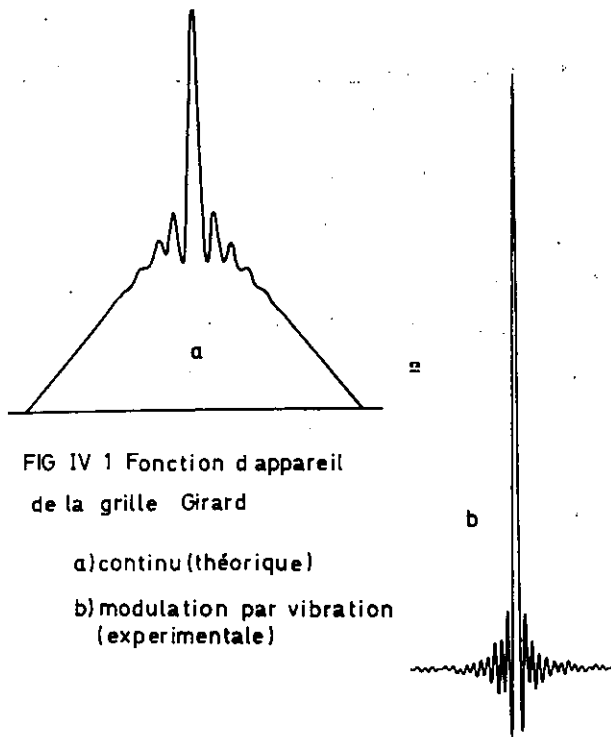
n entier, positif, négatif ou nul.

A la sortie se trouve une grille identique, image monochromatique de la grille d'entrée donnée par le disperser. La fonction d'appareil s'obtient en éclairant le spectromètre avec une radiation monochromatique. Par rotation du disperser on obtient la fonction d'autocorrélation de la répartition des transparences de la grille, qui remplace la classique fonction triangulaire donnée par la fonction d'autocorrélation d'une fente.

Dans le cas de la grille hyperbolique on obtient la fonction donnée par la figure IV - 1.a. La partie centrale fine de cette fonction d'autocorrélation caractérise les qualités spectroscopiques de l'appareil. Pour éliminer la partie triangulaire large, plusieurs procédés sont possibles dont un s'est avéré particulièrement commode d'emploi. Nous le décrivons car les détails de la méthode sont nécessaires à la comparaison du spectromètre à grilles et du spectromètre à fentes. Au cours de la rotation du disperser la grille de sortie ou l'image de la grille d'entrée est animée d'un mouvement vibratoire symétrique par rapport à la position de repos, de fréquence f . Un

tel dispositif donne un signal optique modulé à la fréquence $2f$ au passage de la partie centrale de la fonction d'autocorrélation. Ailleurs seul un signal continu est transmis par la grille de sortie; il n'y a plus de modulation du flux. Un dispositif à détection synchrone donne ainsi la fonction d'appareil représentée par la figure IV - 1.b.

Nous caractériserons une grille par sa largeur spectrale $\Delta\sigma$ (largeur de la grille multipliée par l'inverse de la dispersion linéaire) et par la largeur à mi-hauteur $\delta\sigma$ de la fonction d'appareil.



Cette largeur est donnée par les plus fins détails observables sur la grille, ici le pas le plus serré des hyperboles aux bords de la grille. Nous appelons gain M de la grille le rapport $\frac{\Delta\sigma}{\delta\sigma}$. C'est le rapport de la surface de la grille à la surface de la fente de même hauteur et de même limite de résolution.

Le flux transmis par la grille de sortie au moment de la coïncidence (au sommet de la fonction d'autocorrélation) est $\frac{M}{4}$ fois celui transmis par la fente équivalente. La moitié de ce flux est modulé par la grille dont le gain en flux transmis par rapport à la fente n'est plus que $\frac{M}{4}$.

IV - 1.1.1 CAS MONOCHROMATIQUE: (c'est-à-dire spectre de raies fines suffisamment espacées pour ne donner lieu à aucun recouvrement des images de grilles dans le plan du spectre).

a - bruit de photons: Le gain en rapport signal sur bruit est égal à la racine carrée du gain en flux :

$$G = \frac{\sqrt{M}}{2}$$

En réalité ce gain doit encore être divisé par 2 : d'une part le flux utile est modulé, donc le temps de mesure pour la grille est à diviser par 2 et le rapport signal sur bruit par $\sqrt{2}$, d'autre part la partie non modulée du flux transmis contribue aussi au bruit, dont l'amplitude est donc multipliée par $\sqrt{2}$.

b - bruit de récepteur : Le gain en rapport signal sur bruit est donné par le gain en flux :

$$G = \frac{M}{4}$$

(Ici le récepteur nécessite une modulation du signal avec la fente comme avec la grille; la vibration de la grille n'est donc plus un handicap par rapport à la fente.)

Il se peut qu'on soit obligé d'utiliser avec la grille un récepteur de dimensions supérieures (à cause de l'accroissement de l'étendue de faisceau). Dans ces conditions le récepteur utilisé avec la grille donne un bruit plus important, ce qui atténue le gain. La valeur effective de ce gain dépend des lois de variation du bruit du récepteur en fonction des paramètres géométriques des faisceaux. Pour un récepteur tel que celui que nous avons étudié en II et en supposant que l'adaptation d'étendue soit possible avec la fente le gain n'est plus que :

$$G = \frac{\sqrt{M}}{4}$$

IV - 1.1.2 CAS CONTINU (La luminance spectrale $B(\mathcal{J})$ est constante sur une largeur spectrale au moins égale à $\Delta\sigma$).

a - bruit de récepteur : La seule différence par rapport au cas monochromatique est la présence d'un flux non modulé important provenant des éléments spectraux voisins. Dans la mesure où ce flux ne change pas l'amplitude du bruit du récepteur le rapport signal sur bruit est le même ainsi que le gain par rapport au spectromètre à fentes :

$$G = \frac{M}{4}$$

Les restrictions du paragraphe IV-1.1.b sont valables.

b - bruit de photons : Le flux modulé par la grille est $M/4$ fois supérieur au flux $\bar{\Phi}_0$ transmis par la fente équivalente. Mais le récepteur reçoit simultanément un flux non modulé égal à $M^2 \bar{\Phi}_0 / 4$. Le gain en rapport signal sur bruit par rapport au spectromètre à fentes est donc :

$$G = \frac{M/4}{\sqrt{M^2/4}} = \frac{1}{2}$$

Là encore il faut tenir compte d'une part d'un facteur 2 dû au fait que le flux transmis par une fente n'est pas modulé, et comme d'autre part le bruit des éléments parasites est transmis pendant la totalité du temps, l'amplitude de ce bruit est à multiplier par 2. Le gain en rapport signal sur bruit par rapport à la fente peut donc tomber, dans le cas d'un spectre continu à

$$G = \frac{1}{4}$$

Ce gain peut devenir beaucoup plus faible pour une raie isolée de faible amplitude au voisinage de laquelle des radiations intenses envoient sur le détecteur un flux parasite important, mais il reste supérieur à 1 si les éléments spectraux dans le spectre ne sont pas trop nombreux.

Les résultats précédents sont rassemblés dans le tableau IV-A. Il faut remarquer que tous ces gains peuvent prendre des valeurs plus élevées dans des montages utilisant le faisceau réfléchi par les parties opaques de la grille. Nous avons discuté le montage par vibration parce qu'il est beaucoup plus facile à mettre en oeuvre et que c'est lui que nous avons utilisé dans le montage photographique.

CAS	BRUIT DE RECEPTEUR		BRUIT DE PHOTONS	
	Récept. identiques	Récept. adaptés	Fente modulée	Non modulée
CONTINU	$\frac{M}{4}$	$\frac{M}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
MONOCHROMATIQUE	$\frac{M}{4}$	$\frac{M}{4}$	$\frac{M}{2}$	$\frac{M}{4}$

TABLEAU IV - A

IV - 1.2 SPECTROGRAPHIE PAR GRILLE :

IV - 1.2.1 DESCRIPTION DE LA METHODE : La fente d'entrée d'un spectrographe est remplacée par la grille d'un spectromètre. La plaque qui se trouve à sa place habituelle reçoit les images données de la grille d'entrée

par chacune des radiations monochromatiques constituant le spectre. Une telle superposition donne sur la plaque une image inintelligible qu'il est nécessaire de décoder à l'aide de la même grille. Le flux transmis lorsque l'image de la grille balaye la plaque suivant la direction de dispersion du spectre donne un signal analogue à celui donné par le spectromètre, à ce détail près que le coefficient de transmission de la plaque est une image " négative " du spectre réel. Nous n'étudierons que plus tard les effets de la non linéarité de la réponse de la plaque (cf : appendice).

Le spectrographe fonctionne donc en deux étapes :

1°) prise de vue

2°) décodage de la plaque ou fonctionnement en microdensitomètre à grille. La fonction d'appareil est la même que celle du spectromètre et les mêmes procédés sont applicables pour éliminer la partie triangulaire large. Nous avons choisi la vibration de l'image de la grille. La détection synchrone du flux modulé transmis par la plaque donne un signal proportionnel à la différence entre le coefficient de transmission sur une zone ayant la forme des parties transparentes de la grille et entre le coefficient de transmission moyen de la plaque en cet endroit.

IV - 1.2.2 COMPARAISON AVEC LE SPECTROGRAPHE A FENTE:

Nous supposons le même appareil (même disperseur, même objectif) équipé soit avec la grille, soit avec la fente.

1° - Cas monochromatique :

a - Temps de pose : A condition que l'étendue de la source soit suffisante pour couvrir la grille, le temps de pose nécessaire pour obtenir une densité donnée est le même avec la grille et avec la fente.

b - Rapport signal sur bruit : Si la surface de l'image de fente sur la plaque est s , le rapport signal sur bruit obtenu par la microdensitométrie de l'image de la fente est :

$$\rho_f = \frac{k}{b} n \sqrt{s}$$

k, b et n ont les significations données en II - 6.

La surface de l'image de grille est M_s dont la moitié est impressionnée, si bien que la surface de plaque effectivement utilisée dans la microdensitométrie par grille est $\frac{M_s}{4}$

D'où le rapport signal sur bruit

$$\rho_g = \frac{k}{b} n \sqrt{\frac{M_s}{2}}$$

Le gain en rapport signal sur bruit apporté par l'utilisation d'une grille par rapport à celle d'une fente est :

$$G = \frac{\sqrt{M}}{2}$$

2° - Cas continu :

a - Temps de pose : Sur une largeur de grille il y a M éléments spectraux. Dans le plan de la plaque en un point se recouvrent M images de grilles dont la moitié ont en ce point une zone transparente, l'autre moitié une zone opaque. L'éclairement de la plaque dans le cas de la grille est donc $\frac{M}{2}$ fois plus grand que dans le cas de la fente. Le temps de pose nécessaire pour atteindre une certaine densité de plaque est $\frac{M}{2}$ fois plus court avec la grille.

b - Rapport signal sur bruit : Dans le cas de la fente il est toujours le même

$$\rho_f = \frac{k}{b} n \sqrt{s}$$

Dans le cas de la grille il faut évaluer l'amplitude du signal, qui est la différence de densité entre une zone représentée par l'image de grille de l'élément spectral étudié et le fond de la plaque qu'on peut considérer comme de densité constante. Si n est le nombre de photons reçus par unité de surface de plaque pour atteindre la densité moyenne considérée, seule la fraction $\frac{2n}{M}$ de ces photons contribue au signal de l'élément spectral

étudié. On pourra toujours considérer la réponse de la plaque (en densité ou en transmission) comme linéaire au voisinage de cette densité ce qui nous permet d'écrire le rapport signal sur bruit

$$\rho_g = \frac{k}{b} \frac{2n}{M} \frac{\sqrt{Ms}}{2} = \frac{k}{b} n \sqrt{\frac{s}{M}}$$

D'où le gain en rapport signal sur bruit apporté par la grille

$$G = \frac{1}{\sqrt{M}}$$

Le gain est très inférieur à l'unité. Comme dans le cas du spectromètre, il peut prendre des valeurs encore plus faibles pour des raies peu intenses voisines de radiations très brillantes. Mais il faut aussi considérer le cas intermédiaire entre celui que nous venons d'étudier et le cas d'une raie complètement isolée : c'est le cas d'un spectre de raies d'émission d'intensités comparables pour lequel le gain d'étendue n'est pas complètement anéanti par le recouvrement des éléments spectraux. Le gain en temps de pose est alors moindre que pour un spectre continu mais il peut encore être appréciable (jusqu'à 100 dans les expériences présentées dans l'appendice) et le gain en rapport signal sur bruit reste notablement supérieur à $\frac{1}{\sqrt{M}}$.

IV - 1.2.3 CONCLUSION: Les résultats précédents obtenus par le spectrographe à grille sont tout à fait comparables à ceux obtenus dans le paragraphe IV - 1.1., quant aux cas du bruit de photons. Le parallélisme est masqué par le fait que le gain en rapport signal sur bruit par rapport à la fertés est obtenu à temps de mesure donné dans le cas du récepteur photométrique, alors que l'usage de la grille et de la plaque photographique impose le gain $\frac{M}{2}$ sur le temps de pose. Si on ramène le gain en rapport signal sur bruit à temps de pose donné (il ne s'agit pas, bien sûr, de surexposer la plaque, mais d'obtenir la même densité sur une surface de plaque $\frac{M}{2}$ fois supérieure) le

gain en rapport signal sur bruit devient $\frac{1}{\sqrt{2}}$ qui ne diffère du résultat concernant le récepteur photométrique sensible au bruit de photons que parce que la lumière n'est pas traitée de la même manière dans le spectromètre à grille et dans le spectrographe à grille. Nos évaluations des rapports signal sur bruit ne donnent d'ailleurs que des ordres de grandeur et des différences provenant de facteurs proches de l'unité ne sont pas significatives.

Cette similitude de résultats rassemblés dans le tableau IV - B pour la méthode photographique et pour un récepteur sans bruit propre, est une confirmation de la classification du récepteur photographique faite au paragraphe II - 7.1.

CAS	RECEPTEUR SANS BRUIT PROPRE	PLAQUE PHOTOG. GAIN BRUT	PLAQUE PHOTOG. GAIN A TEMPS DE MESURE EGAUX
MONOCHROMAT.	$\frac{\sqrt{M}}{2}$	$\frac{\sqrt{M}}{2}$	$\frac{\sqrt{M}}{2}$
CONTINU	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{M}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$

TABLEAU IV - B

On doit aussi faire le rapprochement entre le gain de ^{temps} pose apporté par la grille et celui obtenu par l'utilisation de la fente et d'un objectif de sortie de rapport d'ouverture \sqrt{M} fois supérieur. Ce dernier, en offrant un gain M sur le temps de pose, donnera un rapport signal sur bruit divisé par \sqrt{M} . En comparant ces valeurs à celles de la deuxième colonne du tableau IV - B on s'aperçoit que l'usage de la grille ne semble pas apporter d'avantage fondamental. Toutefois d'après l'étude faite au paragraphe III.3.3 nous savons qu'une telle transformation sur un objectif de spectrographe n'est pas toujours possible sans perte de résolution. C'est l'avantage de l'utilisation de la grille de permettre cette transformation sans changement de la distance focale de l'objectif, donc sans changer la limite de résolution

imposée par le gain de la plaque.

Sur un plan plus pratique on peut également remarquer que l'utilisation d'une grille avec $M = 100$ et un objectif ouvert à $f/5$ sera beaucoup plus facile et moins onéreuse que l'utilisation d'un objectif ouvert à $f/0,5$.

IV - 2 - SPECTROGRAPHIE MULTIPLEX:

Nous désignons par ce terme les méthodes qui consistent à enregistrer sur toute la surface utile de la plaque photographique le signal relatif à un élément spectral unique. Les signaux des différents éléments spectraux mélangés sur toute la surface de la plaque ont des fréquences spatiales différentes et sont séparés par la suite par des méthodes d'analyse de Fourier, qui dans les réalisations expérimentales que nous connaissons [24] [25] [26] [27] sont faites par des voies analogiques rappelant les techniques de l'holographie. Dans toutes ces méthodes le signal de chaque élément spectral est obtenu par voie interférentielle, la fréquence spatiale des franges étant proportionnelle au nombre d'ondes des radiations présentes. La méthode s'apparente alors aux montages spectrométriques par transformation de Fourier, mais ici l'interférogramme, au lieu d'être enregistré séquentiellement par exploration de la différence de marche en fonction du temps, est enregistré en bloc.

IV - 2.1 RAPPEL SUR LA SPECTROMETRIE MULTIPLEX:

On sait que le fait de recueillir l'énergie émise par chaque élément spectral pendant tout le temps de la mesure fait gagner sur l'énergie reçue par le récepteur. Pour évaluer le gain en rapport signal sur bruit obtenu par rapport à une méthode à balayage séquentiel il faut encore tenir compte de la nature du bruit qui accompagne le signal. Nous désignons par M le nombre d'éléments spectraux étudiés et nous supposons que l'appareil multiplex et l'appareil séquentiel transmettent un même flux pour une

luminance monochromatique donnée (c'est-à-dire une seule raie dans l'intervalle spectral étudié).

IV - 2.1.1 CAS MONOCHROMATIQUE .

a - bruit de photons : Le gain en rapport signal sur bruit vient du gain en énergie reçue. Il est égal à :

$$G = \sqrt{\frac{M}{2}}$$

compte tenu de la modulation interférentielle.

b - bruit de récepteur : Le temps d'intégration du signal est multiplié par $M/2$ et le temps d'intégration du bruit est multiplié par M . D'où le gain en rapport signal sur bruit :

$$G = \frac{\sqrt{M}}{2}$$

IV - 2.1.2 CAS CONTINU :

a - bruit de récepteur : La présence d'un flux important modulé à une fréquence différente de celle de l'élément spectral intéressé ne change rien ni au bruit ni au signal dans la méthode multiplex comme dans la méthode séquentielle. Le gain est donc toujours :

$$G = \frac{\sqrt{M}}{2}$$

b - bruit de photons : Par rapport au cas précédent le gain en énergie reçue pour chaque élément spectral est le même. Mais il faut ajouter maintenant le bruit produit par les M éléments du spectre. Le flux de ces éléments est $M/2$ fois celui de l'élément étudié et donne un bruit

$\sqrt{\frac{M}{2}}$ fois supérieur. Le gain par rapport à un balayage séquentiel n'est plus que :

$$G = 1$$

Comme dans le cas de la spectrométrie à grille, ce gain peut tomber à des valeurs très inférieures pour des éléments de faible intensité entourés de nombreux éléments intenses.

Au contraire pour des spectres d'émission à raies peu serrées le gain multiplex peut rester supérieur à 1 pour des raies très faibles si le gain en temps de mesure l'emporte sur la perte introduite par le bruit des autres éléments du spectre. Les très beaux résultats obtenus récemment sur les spectres d'émission [28] dans le proche infrarouge laissent espérer des résultats très intéressants dans la partie visible du spectre où le bruit de photons commence à devenir prépondérant.

IV - 2.2. SPECTROGRAPHIE MULTIPLEX:

Nous donnons ici des résultats que nous avons présenté au Congrès International de la spectroscopie par transformation de Fourier (ASPEN, Colorado, Mars 1970) [29] .

Nous allons maintenant comparer un spectrographe à fente et à disperser classique et un appareil superposant sur toute la surface de la plaque les signaux modulés des différents éléments spectraux. Pour rendre comparables les deux instruments nous allons supposer que dans les deux cas la surface de plaque couverte par l'intervalle spectral étudié est la même, que seuls les M éléments spectraux appartenant à l'intervalle spectral sont transmis à la plaque. Nous supposons enfin, comme dans le paragraphe IV - 2.1 que les étendues de faisceau de sortie des deux appareils sont égales. Comme les surfaces de plaque éclairées sont les mêmes cette dernière supposition exige l'égalité des angles solides des faisceaux au niveau des plaques.

Si cette étendue de faisceau est U cela signifie que l'étendue de faisceau d'entrée du spectrographe à disperser est $\frac{U}{M}$ alors que l'étendue du faisceau d'entrée du dispositif interférentiel est U . Nous négligerons les coefficients de transmission des pièces optiques mais nous tiendrons compte du coefficient de transmission moyen égal à $\frac{1}{2}$ du dispositif interférentiel (cf: fig. IV - 2.)

IV - 2.2.1 CAS MONOCHROMATIQUE:

La luminance de la source monochromatique est B . L'éclairement de la plaque est le même:

$$E = B \times \Omega$$

au niveau de l'image de la fente du spectrographe et au niveau d'une frange brillante de l'interféromètre. Le temps de pose pour obtenir une certaine densité D_0 sur les régions impressionnées de la plaque est le même pour des deux appareils:

$$T = \frac{n_0}{B \times \Omega}$$

où n_0 est le nombre de photons que la plaque doit recevoir par unité de surface pour atteindre la densité D_0 .

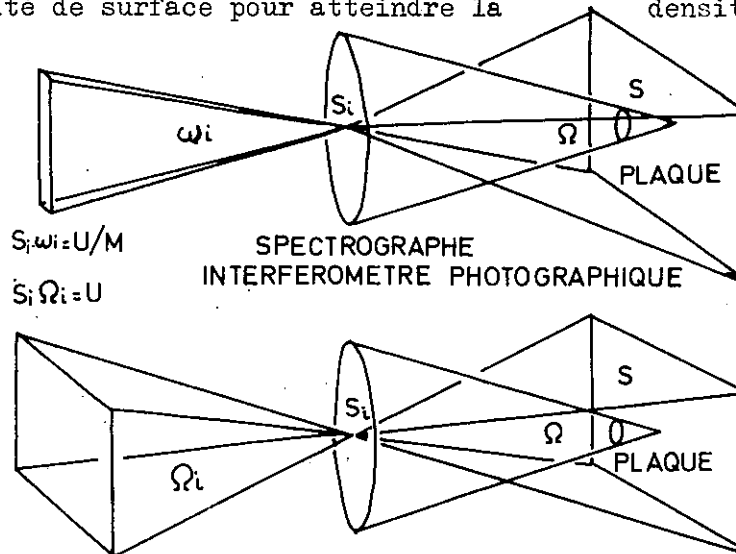


FIG IV 2 SPECTROGRAPHE ET INTERFEROMETRE

La mesure de densité sera faite sur une surface de plaque $\frac{S}{M}$ avec le spectrographe et $\frac{S}{2}$ avec l'interféromètre. Les valeurs des rapports signal sur bruit obtenus sont donc, en reprenant les notations du paragraphe I - 6.

$$\rho_s = \frac{k_o}{b_o} n_o \sqrt{\frac{S}{M}}$$

$$\rho_i = \frac{k_o}{b_o} n_o \sqrt{\frac{S}{2}}$$

IV - 2.2.2 CAS CONTINU :

La luminance de la source est maintenant une luminance spectrale $B(\sigma)$ de valeur constante sur l'intervalle étudié. Si $\delta\sigma$ est la largeur d'un élément spectral nous posons :

$$\int_{\delta\sigma} B(\sigma) d\sigma = B_o$$

L'éclairement de la plaque du spectrographe à fente est :

$$E = B_o \times \Omega$$

L'éclairement de la plaque de l'interféromètre est $\frac{M}{2}$ fois supérieure car en un point de la plaque se superposent maintenant les franges brillantes de $\frac{M}{2}$ éléments spectraux **.

* Le raisonnement suppose une modulation carrée des franges. La forme sinusoidale change en réalité la valeur optimum du temps de pose et le rapport signal sur bruit obtenu. Mais tenir compte de ce fait compliquerait beaucoup les calculs pour ne donner que des résultats numériquement peu différents.

** Nous éludons la mise en phase accidentelle des franges, par exemple à la différence de marche 0, qui donnerait localement un éclairement plus important de la plaque. Un tel phénomène est d'ailleurs à éviter si on veut une réponse optimale.

On pouvait aussi se rendre compte que l'étendue d'entrée de l'interféromètre étant M fois supérieure à celle du spectrographe, le flux transmis, compte tenu du facteur interférentiel $\frac{1}{2}$, conduit à un éclaircissement de la plaque $\frac{M}{2}$ fois supérieur. Nous trouvons donc comme premier résultat un gain en temps de pose égal à $\frac{M}{2}$ en faveur de l'interféromètre.

Le rapport signal sur bruit donné par le spectrographe est le même que précédemment

$$\rho_s = \frac{k_o}{b_o} n_o \sqrt{\frac{S}{M}}$$

Dans le cas de l'interféromètre la surface de lecture est toujours $\frac{S}{2}$ mais l'amplitude de la sinusoïde représentant un élément spectral particulier n'est plus donnée par les n_o photons reçus par unité de surface de la plaque, mais seulement par la fraction $\frac{2}{M}$ de ceux-ci. Nous obtenons ainsi la valeur du rapport signal sur bruit dans la mesure de l'amplitude de cette sinusoïde :

$$\rho_i = \frac{k_o}{b_o} \frac{2n_o}{M} \sqrt{\frac{S}{2}}$$

Le gain en rapport signal sur bruit de l'interféromètre sur le spectrographe est :

$$\frac{\rho_i}{\rho_s} = \sqrt{\frac{2}{M}}$$

Le tableau IV - C rassemble les résultats de comparaison du spectrographe et de l'interféromètre. Le tableau IV - D compare les résultats globaux à ceux obtenus en IV - 2.1.

IV - 2.3. CONCLUSION:

La similitude des résultats que nous venons d'obtenir avec ceux du chapitre IV - 1 concernant la spectrographie à grille est frappante.

		SPECTROGRAPHE	INTERFEROMETRE
Etendue de sortie		U	U
Etendue d'entrée		$\frac{U}{M}$	U
Monochromatique	Flux transmis	$\frac{BU}{M}$	BU
	Eclairement de la plaque	$B \Omega$	$B \Omega$
	Temps de pose	$\frac{n_0}{B \Omega}$	$\frac{n_0}{B \Omega}$
	Rapport s/b	$\rho_0 \sqrt{\frac{S}{M}}$	$\rho_0 \sqrt{\frac{S}{2}}$
Continu	Flux transmis	$B_0 U$	$B_0 U M$
	Eclairement	$B_0 \Omega$	$\frac{M B_0 \Omega}{2}$
	Temps de pose	$\frac{n_0}{B_0 \Omega}$	$\frac{2 n_0}{M B_0 \Omega}$
	Rapport s/b	$\rho_0 \sqrt{\frac{S}{M}}$	$\rho_0 \frac{1}{M} \sqrt{2S}$

TABLEAU IV - C

CAS	PHOTOMETRIE		PHOTOGRAPHIE	
	Bruit récepteur	Bruit de photons	Gain brut	Temps donné
Monochromatique	$\frac{\sqrt{M}}{2}$	$\frac{\sqrt{M}}{2}$	$\sqrt{\frac{M}{2}}$	$\sqrt{\frac{M}{2}}$
Continu	$\frac{\sqrt{M}}{2}$	1	$\sqrt{\frac{2}{M}}$	1

TABLEAU IV - D

Bien sûr, le facteur M n'a pas exactement la même signification dans les deux problèmes. Malgré tout il représente à chaque fois le nombre d'éléments spectraux qui tombe simultanément sur le récepteur.

Ces résultats sont, pour les deux cas traités, identiques à ceux du problème photométrique équivalent utilisant un récepteur sensible au bruit de photons. Nous retrouvons le résultat obtenu sur les spectrographes à fentes comme une nouvelle confirmation de la classification du chapitre II.

Les légères différences obtenues entre les colonnes équivalentes des tableaux IV - B et IV - D ne sont d'ailleurs pas significatives. Dans bien des cas, pour éviter d'alourdir les calculs nous avons supposé des formes simplifiées de modulation et nous avons par exemple négligé l'influence du bruit des zones de la plaque restées vierges dans le cas monochromatique. Ces approximations ont entraîné des variations dans les coefficients numériques. Nous répétons que c'est surtout aux ordres de grandeur qu'il faut accorder de l'importance.

L'étude des méthodes photographiques que nous venons de faire est théorique. Elle suppose par exemple que dans tous les cas la densité idéale de la plaque est atteinte. Dans cette hypothèse les méthodes multiplex ou à modulation d'amplitude ne donnent pas de gain, malgré le plus grand flux transmis, sur le rapport signal sur bruit obtenu avec des spectres continus. Mais on ne doit pas oublier que pour des spectres de raies peu nombreuses, le gain obtenu n'est pas négligeable.

D'autre part l'étude expérimentale de la méthode de spectrographie par grille (cf appendice) nous a montré qu'en réalité cette méthode permettait de mieux respecter les conditions optimales d'utilisation de la plaque que les méthodes traditionnelles. Ceci fait qu'en réalité l'utilisation de telles méthodes peut dans bien des cas, donner des résultats très intéressants.

IV - 3 SPECTROGRAPHIE FABRY-PEROT:

On associe dans certains montages la grande luminosité (c'est à-dire la grande valeur du flux transmis pour un pouvoir de résolution donné) de l'interféromètre de Fabry-Perot au caractère multicanal de la plaque photographique. Nous allons étudier rapidement, car nous allons retrouver des cas déjà étudiés, trois exemples typiques. Le SIMAC [30] est un appareil qui utilise l'anneau central, d'autres méthodes plus classiques photographient une partie ou la totalité d'un ou plusieurs anneaux, et nous parlerons enfin de la possibilité d'utiliser simultanément un grand nombre d'anneaux dans le paragraphe intitulé grille d'anneaux.

IV - 3.1 LE S.I.M.A.C.

Dans cet appareil on photographie le spectre transmis suivant l'axe d'un interféromètre de Fabry et Perot après dispersion des différents ordres par un réseau. On effectue un balayage de l'intervalle entre ordres de l'interféromètre avec un déplacement synchrone de la plaque photographique dans une direction perpendiculaire à la direction de dispersion du réseau. On obtient ainsi en une seule pose la juxtaposition des balayages d'un grand nombre d'ordres de l'interféromètre reçus sur la plaque. La figure IV-3 présente une fraction d'un spectre ainsi obtenu; le balayage est ici effectué sur plusieurs ordres. On peut grâce à cet appareil étudier jusqu'à 2×10^5 éléments spectraux avec un pouvoir de résolution de l'ordre de 10^6 .

Du point de vue du dépouillement de la plaque, le problème est le même que pour un spectrographe à fente, si ce n'est la géométrie plus complexe de la répartition des éléments spectraux. Ceux-ci sont juxtaposés sur des éléments de surface disjoints et le rapport signal sur bruit ne dépend, pour une émulsion donnée, que de la surface d'émulsion consacrée à chacun et de la densité atteinte. Le même problème que pour un spectrographe à fente se pose quant au respect de

FIG IV 3

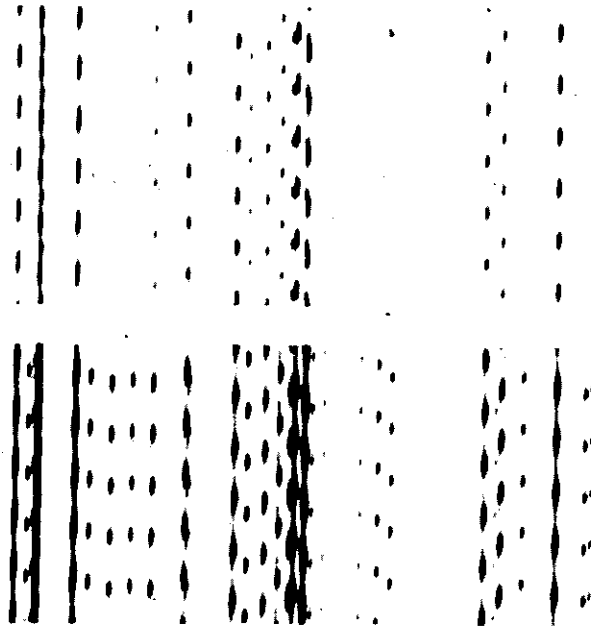
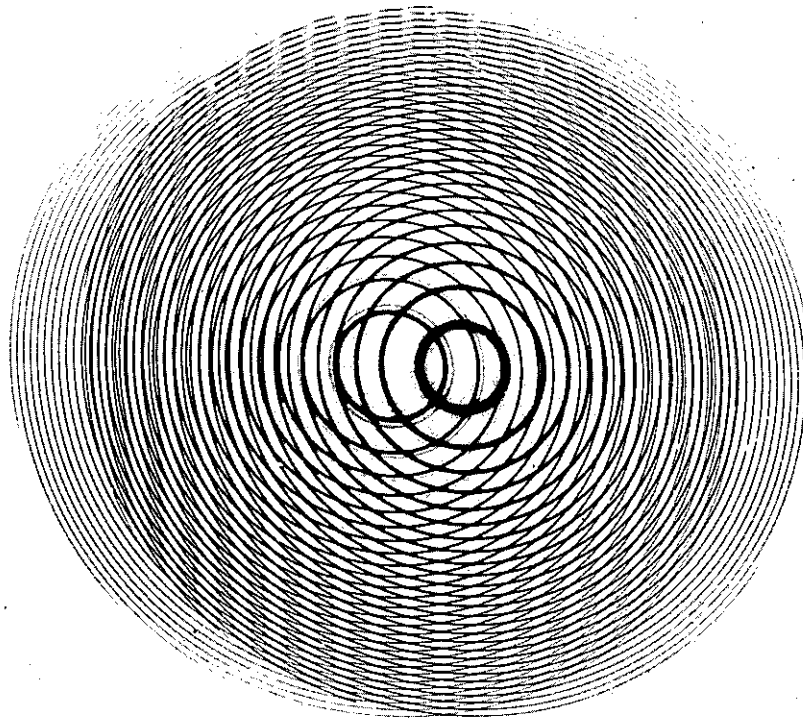
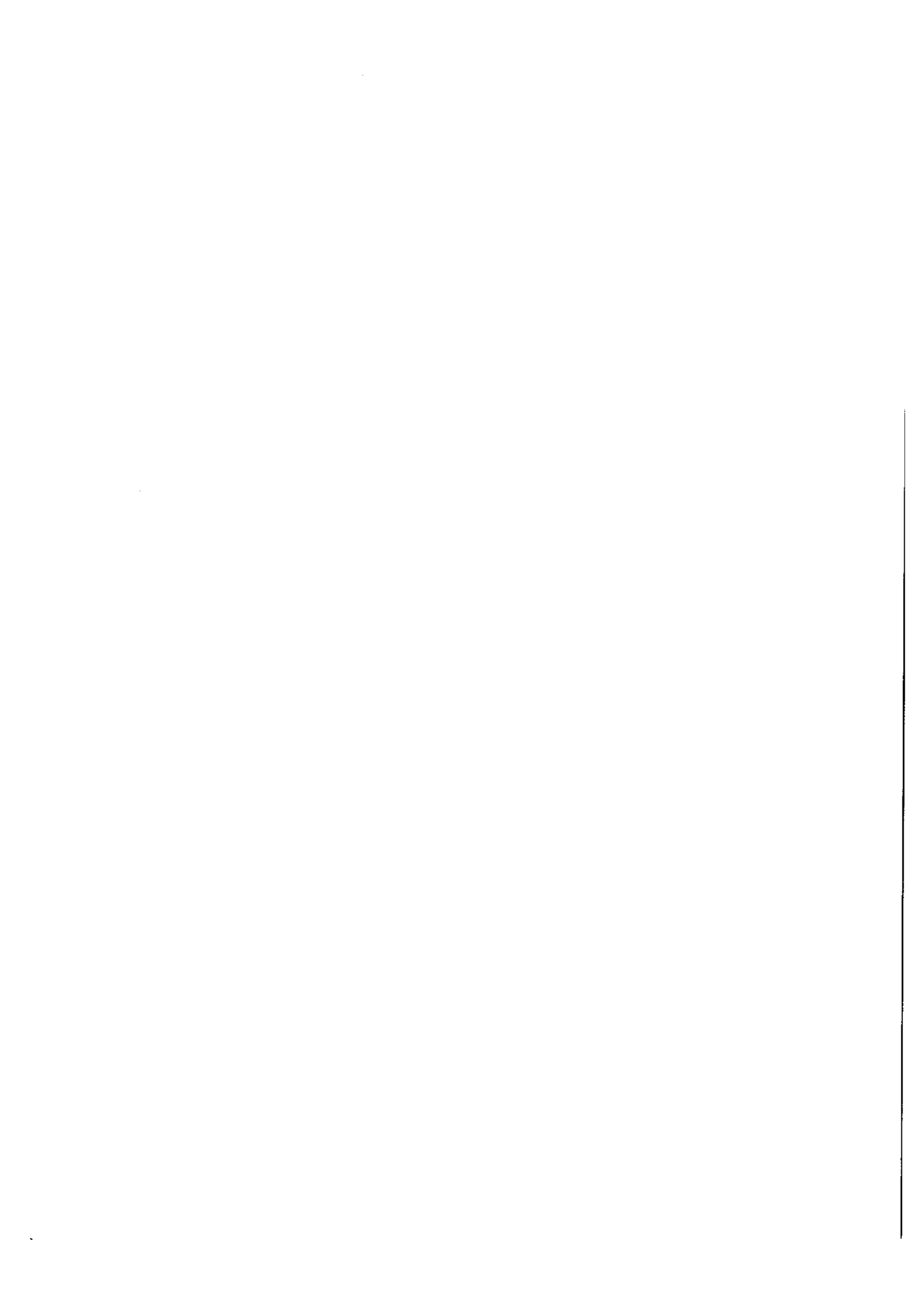


FIG IV 4





bonnes conditions de travail de l'émulsion.

Il y a toutefois un aspect nouveau lié à la géométrie de l'étendue de faisceau de chaque élément spectral. Lorsque la valeur de la distance focale de l'objectif de sortie atteint la limite inférieure F_m définie dans le chapitre III, la surface d'émulsion consacrée à un élément spectral est extrêmement faible et le rapport signal sur bruit correspondant mauvais. La sensibilité du dépouillement microdensitométrique aux moindres parasites tels que poussières, rayures, inhomogénéité de la gélatine, etc... rend cette manipulation très délicate. Il est donc préférable dans le cas du S.I.M.A.C. de déterminer la distance focale, donc l'ouverture de l'objectif, non par la condition imposée par la limite de résolution spatiale de l'émulsion, mais par celle déterminant une valeur acceptable du rapport signal sur bruit.

Dans le cas des spectrographes à fentes c'est la première condition qui s'impose car grâce à la valeur élevée de la hauteur angulaire de la fente, le rapport signal sur bruit garde une valeur appréciable même lorsque la largeur de l'image a sa valeur minimale. Si cela était possible on accepterait même volontiers dans bien des cas de perdre en rapport signal sur bruit pour gagner soit en résolution, soit en rapidité, si la limite de résolution spatiale de l'émulsion le permettait. Rappelons à ce sujet que l'utilisation de la grille ou d'une méthode multiplex autorise une telle opération dans le cas de spectres à grand nombre d'éléments spectraux.

IV - 3.2 PHOTOGRAPHIE D'ANNEAUX.

Plutôt qu'un balayage sur l'anneau central d'un intervalle entre ordres on peut aussi photographier simultanément les éléments spectraux dispersés par l'interféromètre en enregistrant ses anneaux successifs. Là non plus il ne s'agit pas d'un problème photographique nouveau, si ce n'est par la répartition spatiale des différents éléments.

On préfère souvent dans cette manière d'opérer travailler sur

des anneaux marginaux où la dispersion est plus linéaire. Si le dépouillement est ainsi plus commode il a pour contrepartie une perte importante en rapport signal sur bruit si on ne travaille pas avec l'anneau complet. En effet les angles solides des différents anneaux d'ordres successifs, donc les surfaces de leurs images dans le plan de la plaque sont égales. Si on travaille avec un secteur d'anneau d'angle au centre β on ne recueille que la fraction $\frac{2\pi}{\beta}$ du flux qu'on aurait reçu par la tache centrale utilisée dans le S.I.M.A.C.

Pour pallier à cet inconvénient on peut par exemple:

1°) effectuer l'analyse densitométrique de la plaque sur laquelle est photographiée un anneau complet avec une source lumineuse ayant la même forme. Une façon de procéder est d'utiliser un anneau d'un interféromètre de Fabry et Perot avec lequel on effectue un balayage de la plaque par variation de l'épaisseur optique. On obtient ainsi un balayage complet des anneaux marginaux et un balayage linéaire même pour les anneaux centraux. Des essais dans ce sens ont déjà été effectués [51] et nous avons nous-même essayé cette méthode en utilisant simultanément plusieurs anneaux. Les deux difficultés qui s'opposent pour l'instant à un fonctionnement satisfaisant d'un tel dispositif sont

a) la nécessité d'obtenir une finesse suffisante (> 100) du système d'anneaux explorateur pour ne pas dégrader la finesse du système d'anneaux photographié.

b) au cours du balayage c'est le faisceau lumineux qui se déplace et il est très difficile d'obtenir dans ces conditions une valeur stable du flux lumineux transmis en l'absence de plaque.

2°) on peut aussi faire une étude densitométrique classique à l'aide d'une fente de dimensions suffisamment faibles pour ne pas être gêné par le rayon de courbure des anneaux, mais la valeur de la densité mesurée pour une valeur r de la distance au centre des anneaux est la valeur moyenne obtenue sur une rotation complète de la plaque. Cette méthode peut être appliquée à l'amélioration des tirages positifs de ces systèmes d'anneaux: on fait subir cette même rotation du négatif au cours du tirage.

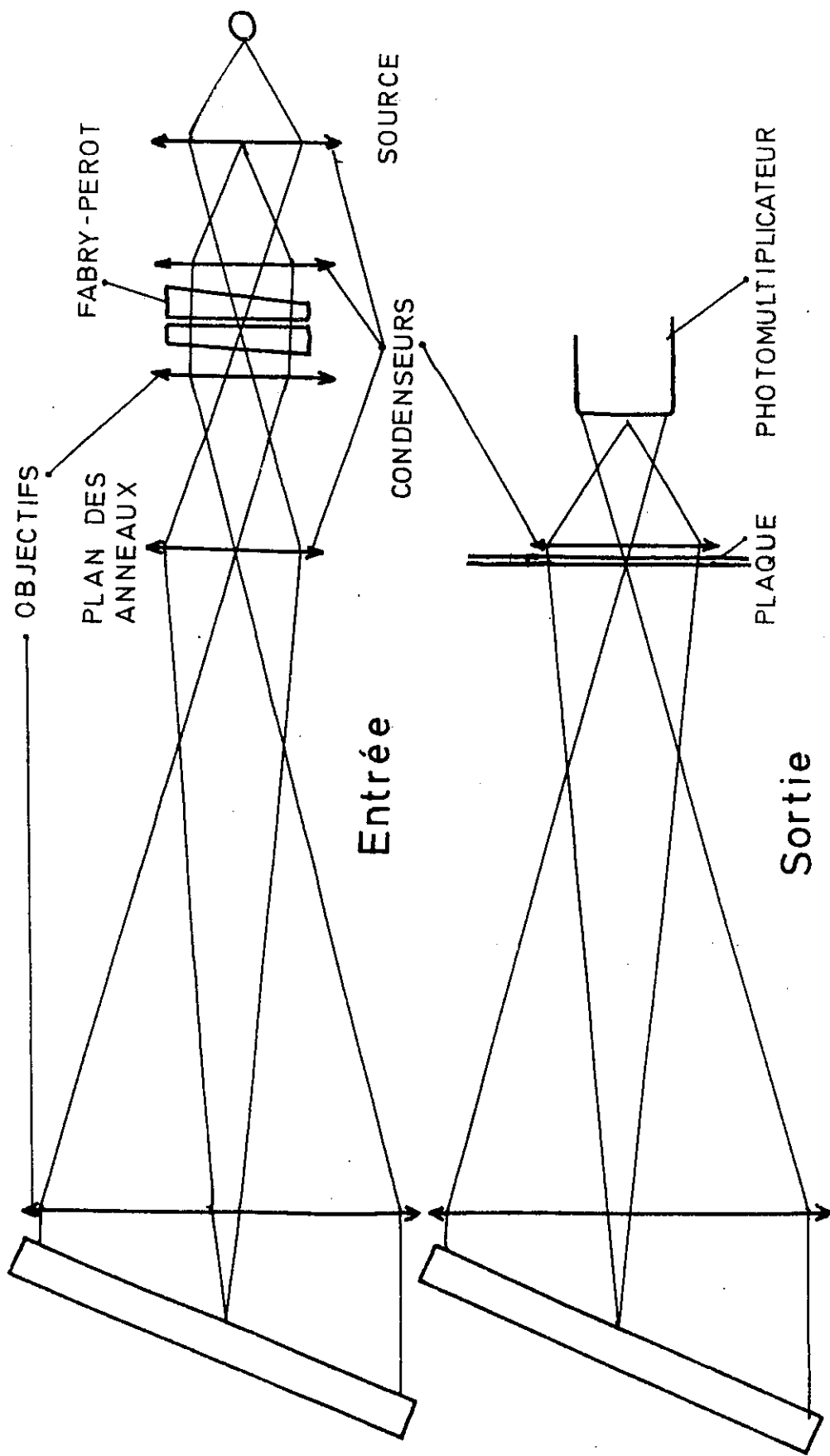


FIG IV 5

IV - 3.3 GRILLE D'ANNEAUX FABRY-PEROT.

L'utilisation simultanée d'un grand nombre d'anneaux d'un interféromètre de Fabry et Perot conduit tout naturellement à l'idée d'une grille ayant la structure de ces anneaux et qui jouerait le rôle de la grille de GIRARD dans un dispositif à dispersaur.

Nous avons fait des essais avec le dispositif décrit sur la figure IV-5. Les anneaux formés dans le plan focal de l'objectif de sortie d'un interféromètre de Fabry et Perot servent de grille d'entrée à un spectrographe à réseau identique à celui que nous avons décrit en IV-1. Les anneaux monochromatiques formés par les éléments spectraux transmis dans les différents ordres sont dispersés sur la plaque par le réseau et les éléments transmis par un même ordre de l'interféromètre sont dispersés par ce dernier. On peut décodifier la plaque ainsi obtenue par une méthode de corrélation identique à celle utilisée en spectrographie par grille (fig. IV-4).

Un certain nombre de points sont propres à ce dispositif et le distinguent de la grille GIRARD que nous avons étudiée.

1°) Le coefficient de transmission moyen d'une telle grille est $\frac{1}{F}$ (où F est la finesse de l'interféromètre) au lieu de $\frac{1}{2}$.

2°) La fonction d'autocorrélation de cette grille a pour largeur à mi-hauteur non pas la largeur de l'anneau le plus fin, mais la distance entre les deux anneaux les plus serrés.

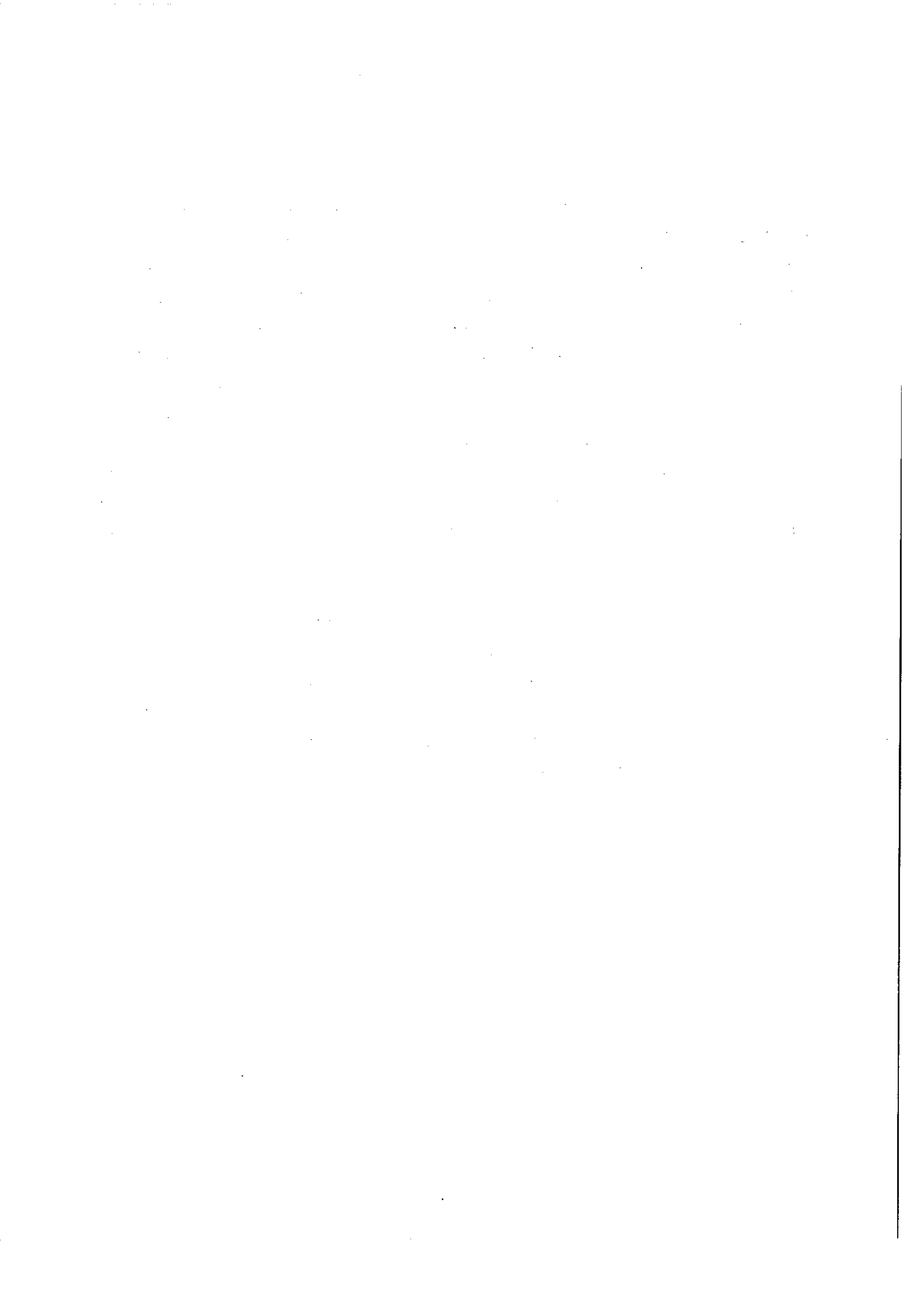
3°) Les pieds sont beaucoup moins importants que ceux d'une grille de coefficient de transmission $\frac{1}{2}$.

Si l'on veut qu'un montage de ce type soit intégral, c'est-à-dire qu'on puisse enregistrer un spectre complet sans superposition des ordres de l'interféromètre on s'aperçoit que le pouvoir de résolution du réseau déterminé par la distance entre deux anneaux fins du bord de la grille, est la fraction $\frac{1}{F}$ de celui qu'il pourrait avoir, puisque l'image des anneaux doit être

assez bonne pour rendre compte de la finesse des derniers anneaux. Un montage beaucoup plus simple réalisant les mêmes performances est obtenu dans ces conditions en remplaçant l'interféromètre par une grille matérielle du type GIRARD ayant pour pas la largeur de ce dernier anneau. Le dispositif ne présente donc aucun intérêt par rapport au montage à grille déjà décrit.

Si on n'exige plus du montage qu'il soit intégral, c'est-à-dire si on accepte un recouvrement des différents ordres du Fabry-Perot, l'interféromètre permet d'atteindre des pouvoirs de résolution supérieurs à la résolution théorique du réseau. Un raisonnement analogue à celui que nous avons fait au paragraphe IV -1 montre que le gain en temps de pose (plus faible que pour une grille GIRARD à cause de la finesse du système d'anneaux) est compensée par une perte équivalente en rapport signal sur bruit. On peut y voir malgré tout les avantages dont nous avons déjà parlés quant à la linéarité de la réponse de l'émulsion.

Nous signalerons enfin un dernier inconvénient propre à tous les dispositifs utilisant un interféromètre de Fabry-Perot sur plusieurs anneaux simultanément (ce point ne touche donc pas le SIMAC) : pour chaque élément spectral une étendue considérable doit être fournie par la source, mais dans cette étendue la fraction $\frac{F-1}{F}$ de l'énergie est renvoyée vers la source. Il y a donc un gaspillage important de l'énergie émise.



CHAPITRE V

CONCLUSION

A partir de la loi de réciprocité concernant le signal et de la loi de SELWYN concernant le bruit d'une plaque photographique, nous avons montré l'identité des propriétés du rapport signal sur bruit donné par ce récepteur et par un récepteur quantique tel qu'un photomultiplicateur. Nous avons retrouvé cette identité dans l'étude des spectrographes à fente et de quelques dispositifs spectrographiques récents. La conclusion de cette étude est donc que la qualité d'une mesure faite par voie photographique est déterminée par la nature quantique du signal lui-même, compte tenu de la valeur numérique du rendement quantique équivalent de l'émulsion dont nous avons vu qu'elle était beaucoup plus faible que celle des photocathodes. Ce résultat suppose que le signal étudié est d'intensité suffisante pour donner à l'émulsion la densité qui donne sa valeur maximum à ce rendement quantique. Lorsque ce n'est pas le cas et qu'une préexposition est nécessaire nous avons vu que l'émulsion se comportait comme un récepteur à bruit propre mais que l'addition du flux de préexposition se traduisait par une valeur très amoindrie du rendement quantique équivalent.

On peut résumer ainsi la situation : un récepteur sans bruit propre offre un rendement quantique équivalent indépendant du signal mesuré. Un récepteur présentant un bruit propre indépendant du signal donne un rendement quantique équivalent proportionnel au signal reçu. Pour le récepteur photographique on peut distinguer un domaine de fonctionnement en sous exposition pour lequel le rendement quantique équivalent augmente avec le signal et où l'on peut dire que la plaque présente un bruit propre, un domaine où le rendement quantique équivalent est maximal et stationnaire; dans ce domaine de dynamique restreinte, la plaque photographique se comporte comme un récepteur quantique sensible au bruit de photons. Enfin on trouve un domaine de surexposition où le rendement quantique équivalent décroît quand le signal augmente. On doit évidemment dans la mesure du possible s'en tenir au domaine intermédiaire et c'est seulement si le signal traité s'y trouve que la valeur maximale du rendement quantique équivalent de la plaque est atteinte et que la conclusion de notre étude est valable.

Comme conséquence nous en avons déduit un critère de qualité pour les spectrographes à fentes qui est fondé sur le flux transmis plutôt que sur l'éclairement dans le plan de la plaque en montrant que pour un dispersur donné tout accroissement de rapidité s'accompagne d'une perte corrélative du rapport signal sur bruit, pour un spectrographe comme pour un spectromètre. C'est ainsi que nous avons insisté sur le fait que l'utilisation des objectifs très ouverts n'étaient pas a priori un gage de qualité, et que par exemple la nécessité d'utiliser avec ces objectifs des émulsions à grain fin et peu sensibles pouvait annuler le gain de rapidité qu'on pense obtenir par l'augmentation d'éclairement. Ceci se traduit par le fait expérimental que des émulsions de rapidités très différentes ont des valeurs comparables de leur rendement quantique équivalent, et que la qualité d'une mesure ne dépend finalement que du nombre de photons transmis et de la valeur de rendement quantique. Naturellement, cette dernière conclusion n'est plus valable pour les spectres très faibles pour lesquels la préexposition est nécessaire. Pour de tels problèmes le rapport signal sur bruit sera d'autant meilleur à temps de mesure donné que l'ouverture de l'objectif sera plus grande.

Mais dans ce cas l'utilisation des méthodes nouvelles que nous avons étudiées est préférable.

Nous avons déduit comme autre conséquence de la nature quantique du bruit photographique l'inefficacité des méthodes nouvelles, application au domaine photographique de techniques récemment développées dans le domaine infrarouge : utilisation de grilles codeuses et méthodes multiplex. Nous avons montré que le gain de luminosité apporté par ces méthodes était annihilé dans le cas des spectres à grand nombre d'éléments spectraux par la superposition des bruits de photons de ces éléments, résultat bien connu pour ces méthodes lorsqu'elles sont mises en oeuvre avec un photomultiplicateur.

Malgré cette conclusion défavorable, nous redisons ici les avantages pratiques que peuvent présenter ces méthodes par rapport aux méthodes classiques à fente et disperser :

1° - Lorsque les éléments spectraux ne sont pas très nombreux dans le spectre, le gain en flux transmis se traduit par une amélioration du rapport signal sur bruit.

2° - La comparaison que nous avons faite suppose toujours la plaque utilisée à la valeur optimale de sa densité. Dans un problème pratique cette condition est rarement respectée dans un spectrographe à fente, elle l'est beaucoup mieux dans un spectrographe à grille ou dans un spectrogramme multiplexé.

3° - Dans tous les cas où la préexposition est nécessaire par la méthode classique, les méthodes que nous avons étudiées offrent une préexposition automatique par les éléments du spectre étudié. En évitant l'intervention d'un flux continu parasite, on évite l'introduction d'un bruit de photons parasite et on gagne un facteur fondamental dans le rapport signal sur bruit.

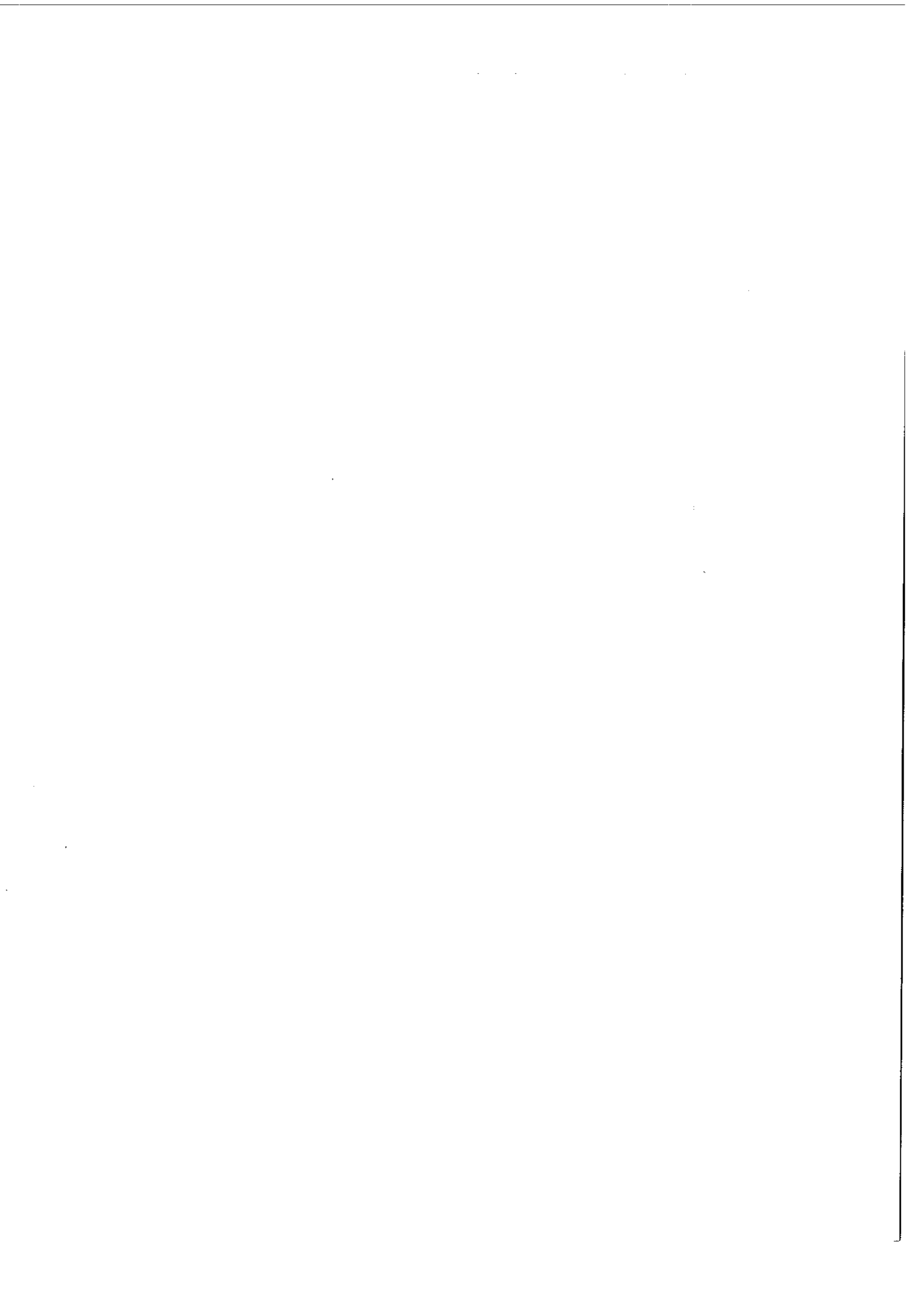
4° - Des raisons d'ordre pratique peuvent jouer un rôle important, comme la linéarisation de la réponse de la plaque que nous étudions à propos de la spectrographie par grille dans l'appendice.

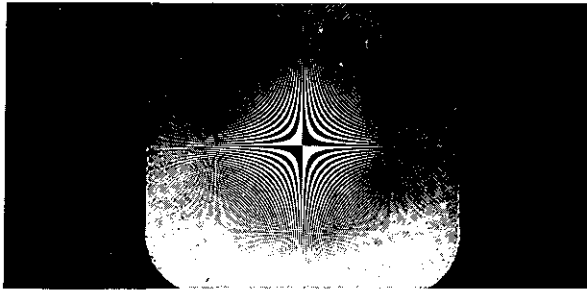
Cette comparaison de différentes méthodes photographiques entre elles étant faite, il nous reste à comparer les méthodes photographiques aux méthodes photométriques. Le récepteur photographique se caractérise par la faible valeur de son rendement quantique équivalent, mais cet inconvénient est compensé, pour beaucoup de problèmes, par son caractère multicanal très utile tant en spectroscopie que dans d'autres domaines à très grand nombre d'éléments (Spectrographie Paschen Runge, Atlas astronomiques, photographie aérienne). Dans d'autres problèmes à moindre quantité d'information c'est la possibilité des très grandes constantes de temps ou très courtes constantes de temps qui font préférer ce détecteur. Dans bien des cas la plaque photographique travaille dans des conditions très défavorables et le développement des méthodes que nous avons décrites devrait permettre des progrès sensibles.

Quant à l'amélioration du récepteur lui-même les progrès à attendre dans ce domaine sont, plutôt que des émulsions très rapides ou des émulsions à grain très fins, des émulsions qui combindraient ces deux qualités pour donner un récepteur multicanal offrant une valeur plus élevée du rendement quantique équivalent. Un grand pas dans cette voie a été accompli par la caméra électronique de A. LALLEMAND qui offre le rendement quantique des meilleures photocathodes. Malheureusement le nombre d'éléments traitables simultanément est encore faible et l'utilisation de cet appareil (qui a été tentée avec succès sur le SIMAC [30]) encore délicate.

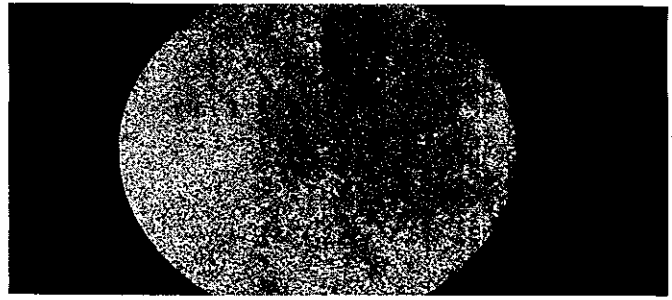
D'autres perspectives sont entrevues dans les progrès récents des détecteurs d'images tels que les amplificateurs d'image et les caméras ORTHICON, qui permettent déjà l'étude de quelques centaines de milliers d'éléments distincts, mais le bruit propre de ces appareils détériore considérablement leur rendement quantique équivalent pour les signaux de bas niveaux.

On peut enfin expliquer la faiblesse du rendement quantique équivalent des émulsions par la complexité des mécanismes photochimiques mis en oeuvre, grands consommateurs de photons. De nouvelles substances photosensibles les photochromes, semblent permettre de meilleurs rendements et une très grande capacité d'information, mais leur emploi comme détecteur n'est pas encore mis au point.





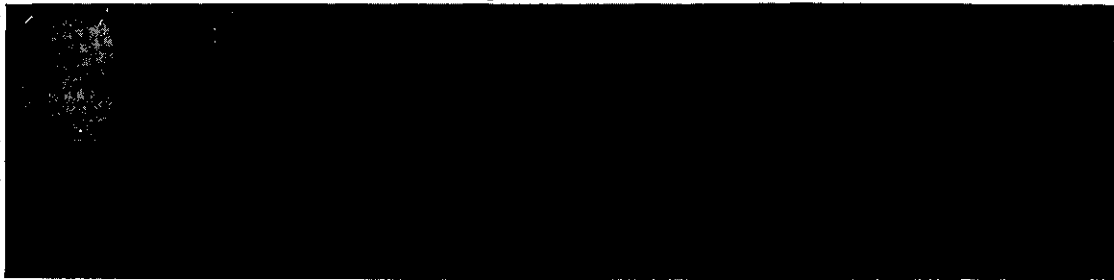
a



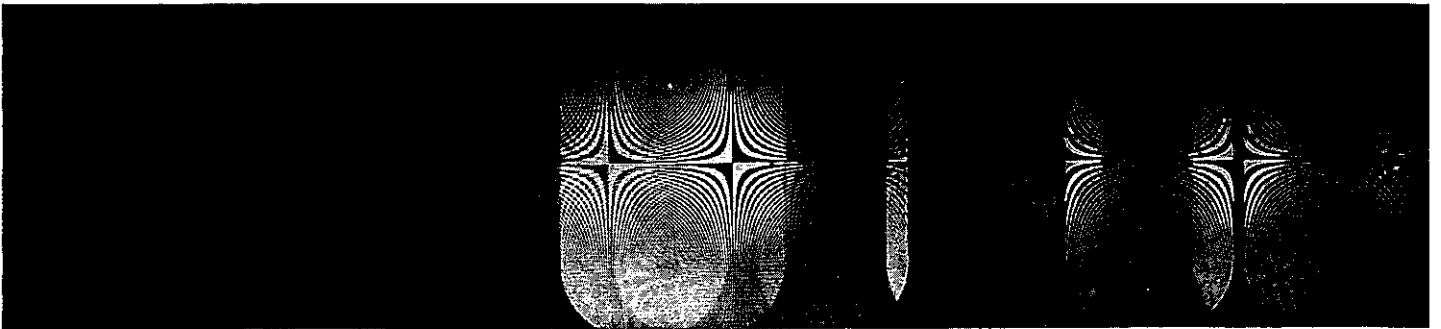
b



c



d



e

FIG A 1 a)Grille GIRARD
b)Grille MORET BAILLY
c)Spectre du fer (M-B)
d) idem (G)
e) Spectre du néon (G)

A P P E N D I C E

L E S P E C T R O G R A P H E A G R I L L E

A - 1 - PRINCIPE DE LA METHODE:

A - 1.1 EXPOSITION DES PLAQUES.

Dans un spectrographe à fente classique on remplace la fente d'entrée par une grille. On obtient sur la plaque une image de grille par élément spectral centrée à l'emplacement de la "raie" que l'on aurait observée avec la fente. Ces images se superposent plus ou moins suivant la richesse du spectre et sont alignées suivant la direction de dispersion du spectre. La figure A - 1 représente des spectres de raies plus ou moins riches photographiés à l'aide des deux types de grilles que nous avons utilisés, et dont les représentations plus détaillées sont données sur les planches hors-texte. La grille de GIRARD est un réseau d'hyperboles équilatères. Sa limite de résolution spatiale est déterminée par le pas de ces hyperboles aux bords supérieur et inférieur de la grille, la dispersion étant supposée horizontale. La grille de MORET-BAILLY est une juxtaposition de perforations rectangulaires. De disposition primitivement aléatoire, ces grilles sont maintenant calculées sur ordinateur [32] d'après des critères choisis par l'expérimentateur. L'apadisation proche de la fonction d'appareil donnée par

ces grilles est meilleure que celle des grilles hyperboliques et la forme rectangulaire des perforation tolère un léger astigmatisme de l'optique du spectrographe. La limite de résolution spatiale est donnée par la largeur d'un rectangle élémentaire.

A - 1.2 DEPOUILLEMENT DES PLAQUES.

Telle quelle la plaque n'est pas lisible par simple observation. On en fait une étude densitométrique à l'aide de la grille qui a servi à la prise de vue. On étudie ainsi la fonction de corrélation de la fonction transmission de la plaque $P(x,y)$ par la fonction transmission de la grille $G(x,y)$, ou plus exactement la section de cette fonction de deux variables par le plan $y = 0$, l'axe Ox étant parallèle à la direction de la dispersion. Comme pour le spectromètre à grille on est gêné par la partie basse fréquence spatiale de la fonction d'autocorrélation de la grille. On peut à nouveau éliminer ce défaut par une oscillation de l'image de la grille en ne détectant que la composante alternative du signal microdensitométrique. Pour les raisons exposées plus loin ce dépouillement se fait sur le montage de prise de vue de sorte que le même appareil se comporte successivement comme un spectrographe à grille, puis comme un densitomètre à grille.

A - 2 - DESCRIPTION DU MONTAGE OPTIQUE .

A - 2.1 MONTAGE SIMPLE

Il est rappelé sur la figure A - 2. Ici la source est conjuguée du réseau ce qui est préférable pour obtenir un éclaircissement constant sur la grille avec une source inhomogène mais approximativement isotrope. Le montage utilisé est le montage autocollimateur LITTROW avec utilisation d'un seul objectif. Ce montage est défavorable en ce qui concerne les problèmes de lumière parasite mais il s'est imposé pour la qualité des images et la possibilité de compensation des distorsions exposée dans le

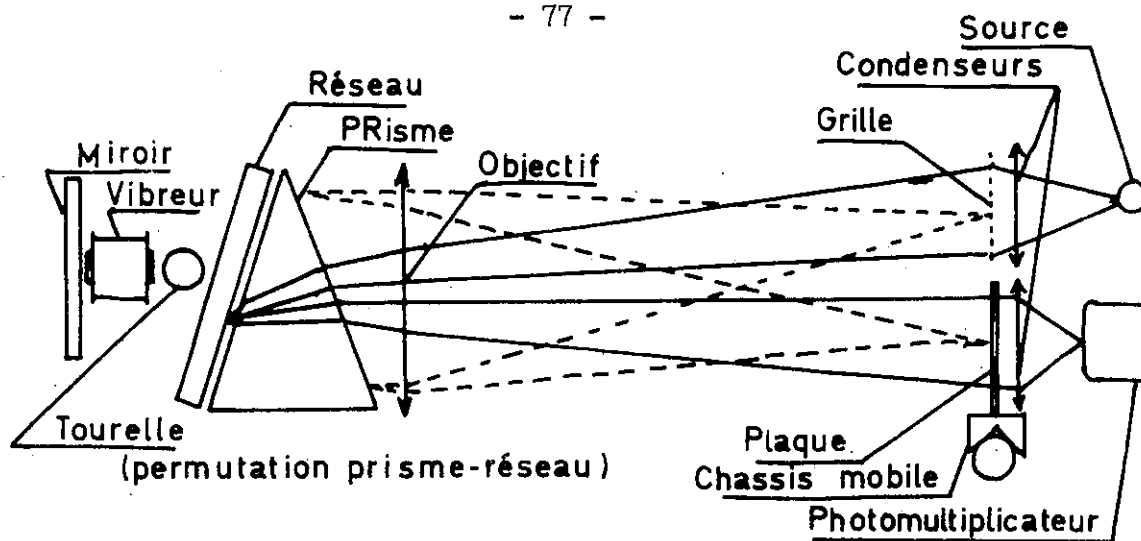


FIG A.2 Schéma optique. Montage compensé
(pour le montage simple, supprimer le prisme, le miroir et la tourelle)

paragraphe suivant.

La plaque est portée par un chassis ajourable et susceptible de subir une translation de bonne qualité dans une direction rigoureusement parallèle à la direction de dispersion du réseau. Ce point est probablement l'un des plus délicats du montage car sur une translation de 80 mm l'écart ne doit pas dépasser une dizaine de microns, soit une précision angulaire de l'ordre de $25''$ (sur la figure A-2 le système disperser a été représenté tourné de 90° autour de l'axe optique pour des commodités de dessin). Ce réglage doit être fait avant la prise de vue, c'est-à-dire avant que cette direction ne soit matérialisée sur la plaque. Lorsqu'il est convenablement effectué il subsiste un défaut du second ordre, dû au fait que le spectre n'étant pas exactement dans le plan de section principale du réseau, il est dispersé non pas suivant une droite, mais suivant un arc de cercle. Nous avons été conduit à mettre au point un dispositif de correction mis en oeuvre au cours du dépouillement, et qui corrige aussi bien ce défaut du second ordre qu'un léger défaut de parallélisme du premier ordre.

Derrière le chassis un dernier condenseur forme, à la lecture de la plaque, l'image du réseau sur un photomultiplicateur. Pour cette lecture on utilise le même montage éclairé par une radiation monochroma-

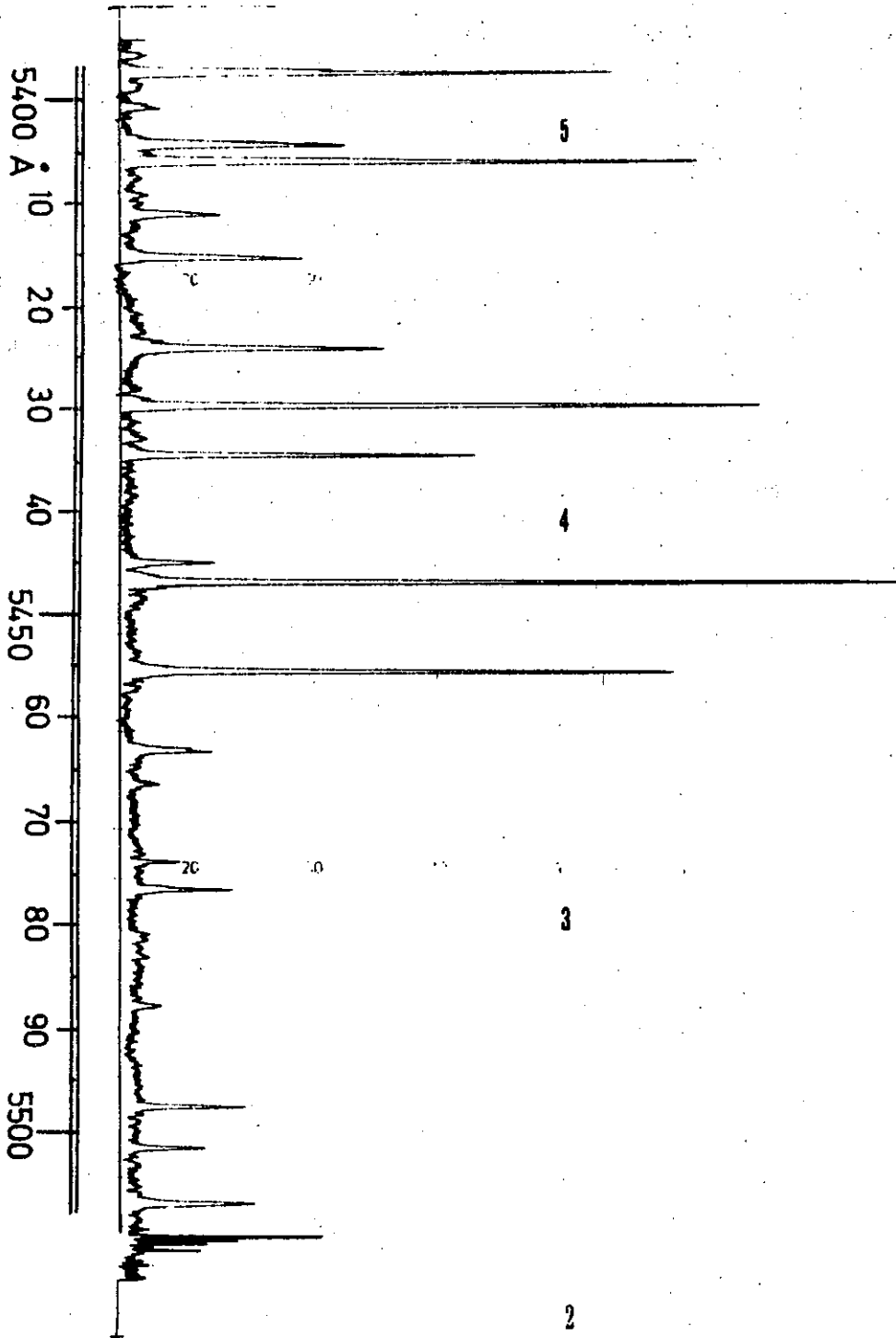
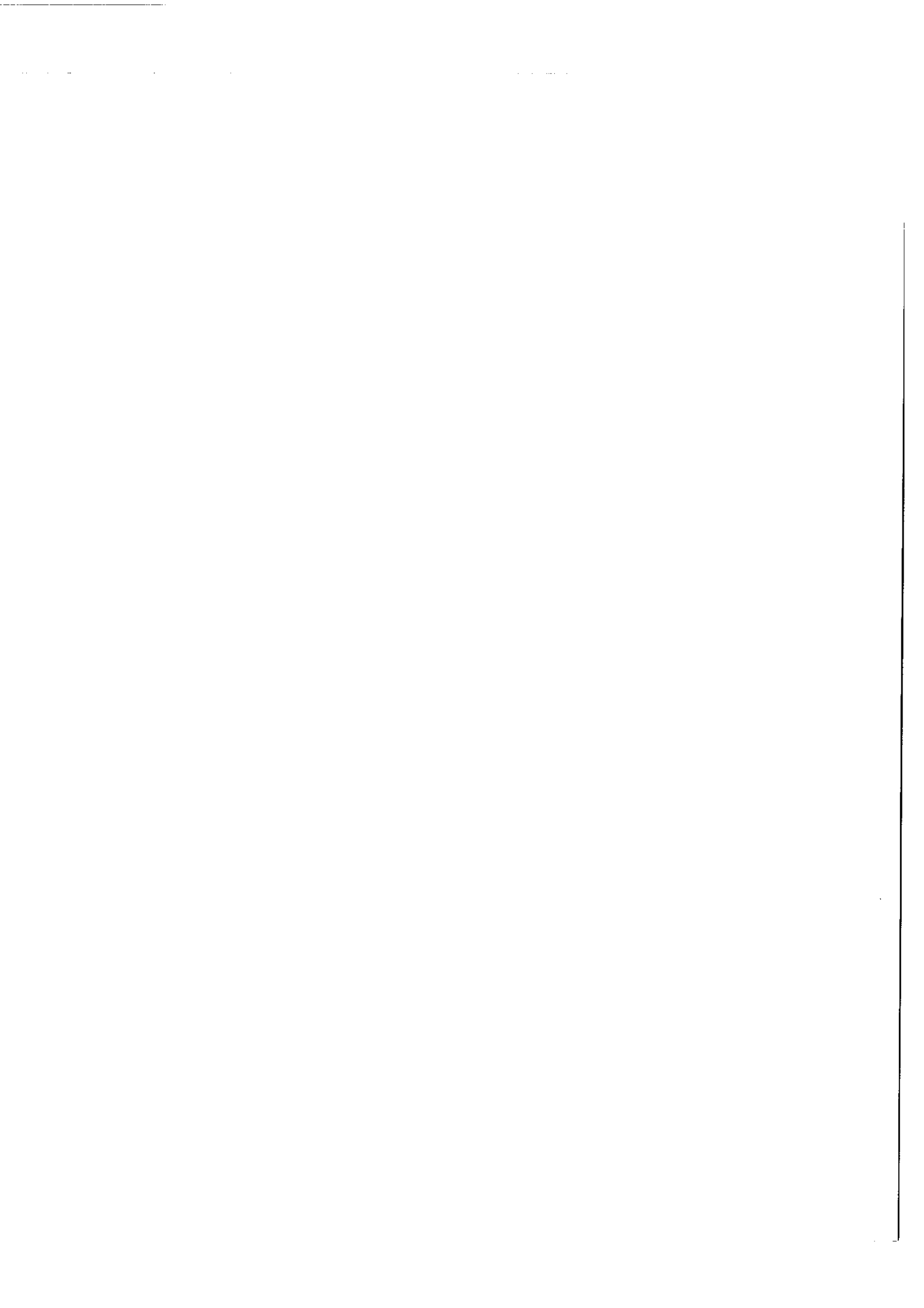
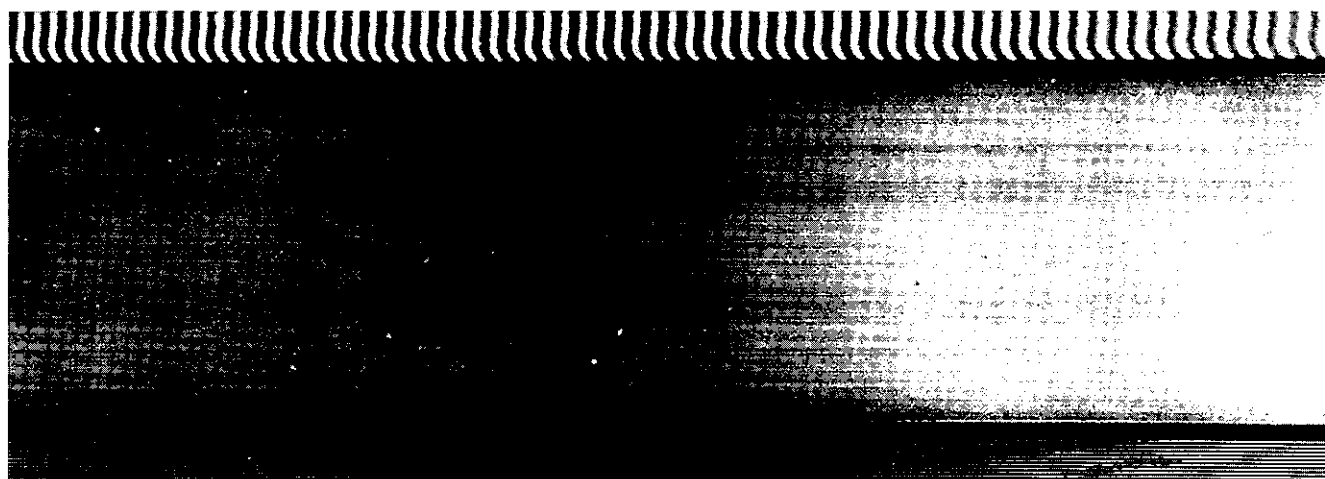
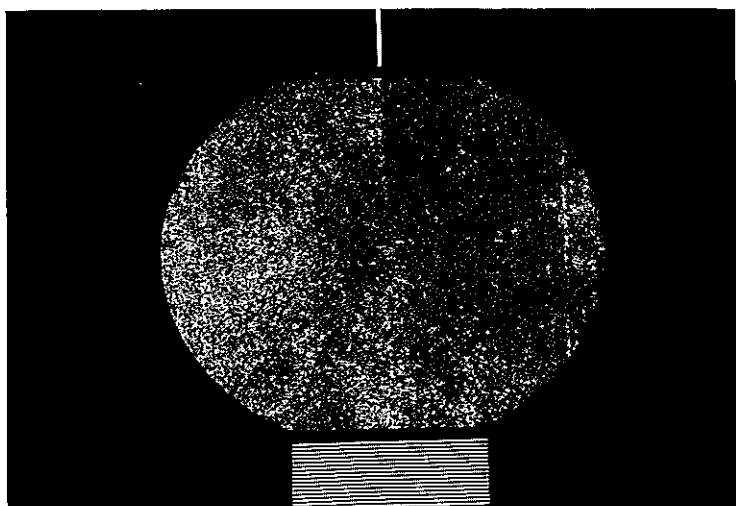


FIG A 3 Spectre obtenu sur montage
non compensé (fer)





b↑



←a

FIG A 4 a) La grille et les faisceaux de référence
b) Spectre correspondant (fer)

-tique pour compenser les distorsions données par le réseau sur l'image de la grille. C'est avec ce montage que nous avons obtenu l'un de nos premiers spectres (fig A.3) publié à l'occasion du Colloque de Spectroscopie Instrumentale (ORSAY, 1966) [30] .

De part et d'autre de la grille se trouvent deux faisceaux de référence dont l'un forme dans le plan de la plaque un spectre cannelé qui servira à l'étalonnage, l'autre donne l'image d'un réseau de Moiré qui permet, à la lecture, de surveiller la position moyenne de la grille vibrante par rapport à la plaque au cours de sa translation. La figure A.4 donne une représentation du spectre obtenu encadré de ces deux références.

A - 2.2 DISTORSIONS - COMPENSATION:

Le spectre de la figure A.3 est limité par la qualité de la fonction d'appareil à ses extrémités. En effet les distorsions données par le réseau sont compensées au centre du champ pour la longueur d'onde de la radiation de lecture (raie 5461 Å du mercure) mais elles évoluent rapidement dans le champ de la plaque .

A - 2.2.1 GRANDISSEMENT TRANSVERSAL PARALLELE A LA DISPERSION:

Pour un réseau éclairé sous l'incidence i_1 et qui diffracte dans la direction i_2 ce grandissement vaut (fig. A.5).

$$\frac{di_2}{di_1} = - \frac{\cos i_1}{\cos i_2}$$

Il est égal à -1 en montage autocollimateur (donc ne donne pas lieu à distorsion pour $i_2 = i_1$) mais il varie au premier ordre en i_2 de part et d'autre de cette direction. Cette variation du grossissement est lié à la variation de la largeur de la section droite de la pupille en fonction de i_2 . On rendrait le grandissement latéral stationnaire dans la

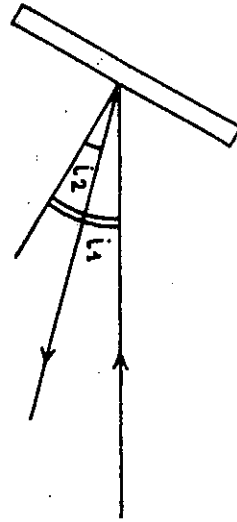


FIG A.5 Grandissement latéral

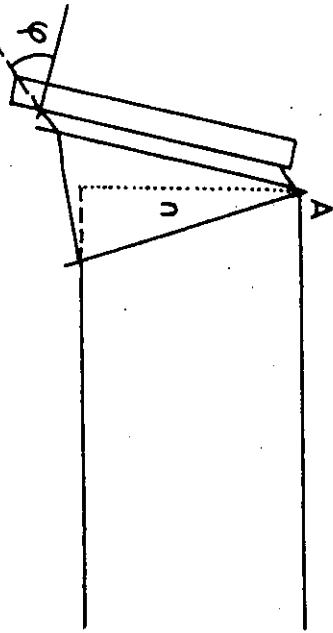


FIG A.6 Prisme compensateur

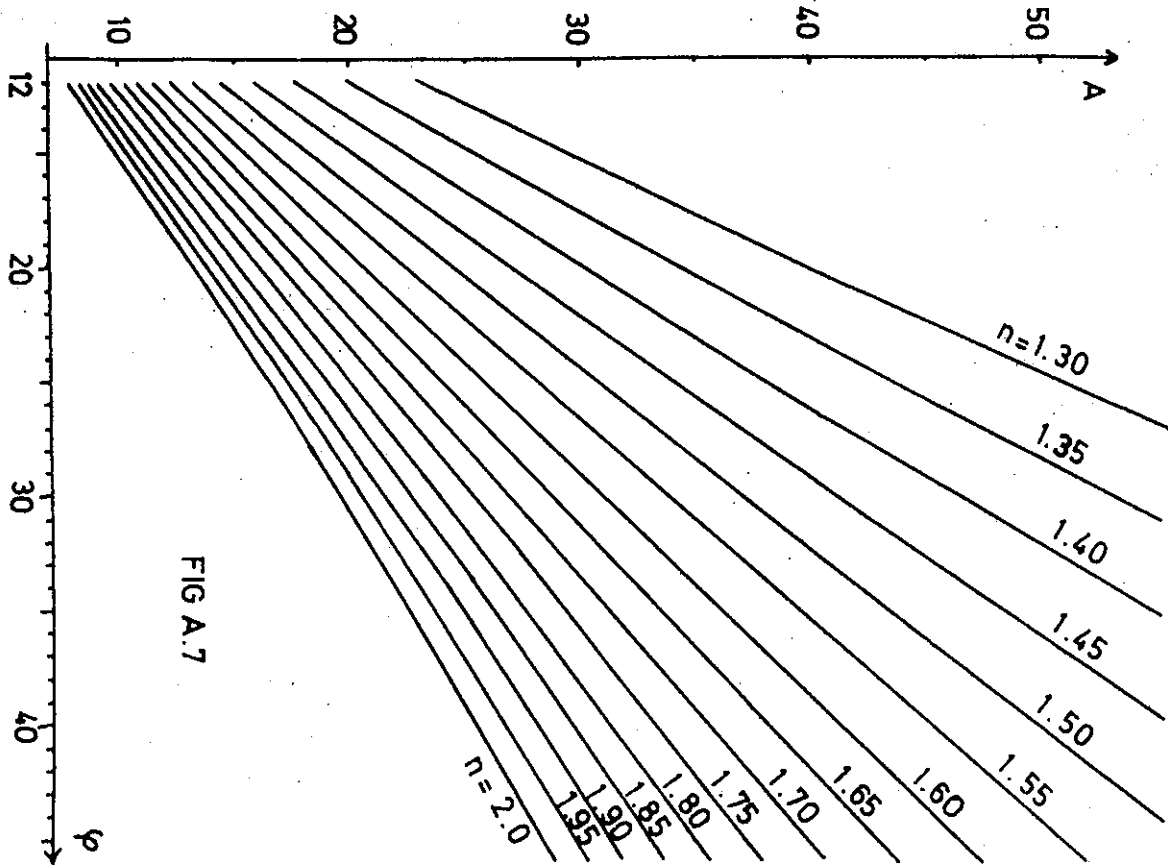


FIG A.7

direction i_2 si l'image de cette pupille était perpendiculaire à la direction i_2 . Ceci est réalisable soit en travaillant avec un angle d'émergence $i_2 = 0$ dans un montage non autocollimateur, mais c'est également possible en gardant $i_2 = i_1$ par l'utilisation d'un prisme placé devant le réseau dont l'indice et l'angle sont tels que, dans l'approximation de Gauss, l'image géométrique donnée du réseau par le prisme soit perpendiculaire au faisceau incident (fig. A.6) . Les relations qui lient A et n à φ , angle d'autocollimation du réseau sont :

$$\sin r = \sin \left(\frac{A}{n} \right)$$

$$\sin \varphi = n \sin (A - r)$$

Un programme d'itération très simple sur ordinateur nous a donné un ensemble des courbes $A = f (n)$ pour différentes valeurs de φ (fig.A.7)

Cette compensation n'est effective que pour des valeurs de A inférieures à 40° . Au delà l'astigmatisme du prisme ne permet plus de considérer d'image géométrique .

A - 2.2.2 COURBURE DE GRILLE: On sait que d'une fente droite un réseau donne une image parabolique car si la différence de marche entre deux traits du réseau pour deux rayons dans le plan de section principale est :

$$\delta_0 = a (\sin i_1 + \sin i_2)$$

pour des rayons qui font l'angle β avec le plan de section principale elle est :

$$\delta = a (\sin i_1 + \sin i_2) \cos \beta = \delta_0 \cos \beta$$

La condition $\delta = k \lambda$ impose donc avec β une variation de $\sin i_2$ qui compense celle de $\cos \beta$.

Si on admet pour la valeur maximum de la flèche la

largeur d'un élément spectral on trouve comme limitation pour β :

$$R = \frac{2tgi}{\delta i_2} \quad a \cos i_2 \delta i_2 = 2a \sin i (1 - \cos \beta)$$

$$1 - \cos \beta = \frac{i^2}{2} = \frac{1}{2tgi} \frac{2tgi}{R} = \frac{1}{R}$$

Si on admet qu'on donne à la grille un contour circulaire l'angle solide disponible est

$$\Omega = \pi i^2 = \frac{2\pi}{R}$$

Cette expression valable pour les spectromètres interférentiels non compensés nous rappelle que l'expression de Ω écrite plus haut est celle d'un interféromètre à division de luminance et symétrie de révolution. Sans compensation de la courbure un spectrographe à grille (tout comme un spectromètre à grilles) peut travailler avec un angle solide égal à $\frac{2\pi}{R}$ comme tout spectromètre interférentiel non compensé.

L'utilisation du même appareil à la prise de vue et pour le dépuillement effectue une compensation automatique de la courbure de grille, mais elle n'est valable que pour un faible domaine de longueurs d'onde (la flèche de courbure dépend de $\sin i_2$).

P. CONNES [3] a montré à propos du SISAM (et nous avons appliqué ce résultat à un interféromètre à deux ondes [11]) que l'emploi d'un prisme tel que celui décrit dans le paragraphe précédent supprimait les variations de δ avec β . En ramenant les images des traits du réseau dans un plan perpendiculaire à la direction des faisceaux pour rendre le grandissement transversal stationnaire on compense du même coup la courbure donnée par le disperseur.

Ainsi l'emploi du prisme compensateur placé devant le réseau nous apporte deux avantages :

- 1) on peut dépouiller la plaque sur un domaine spectral

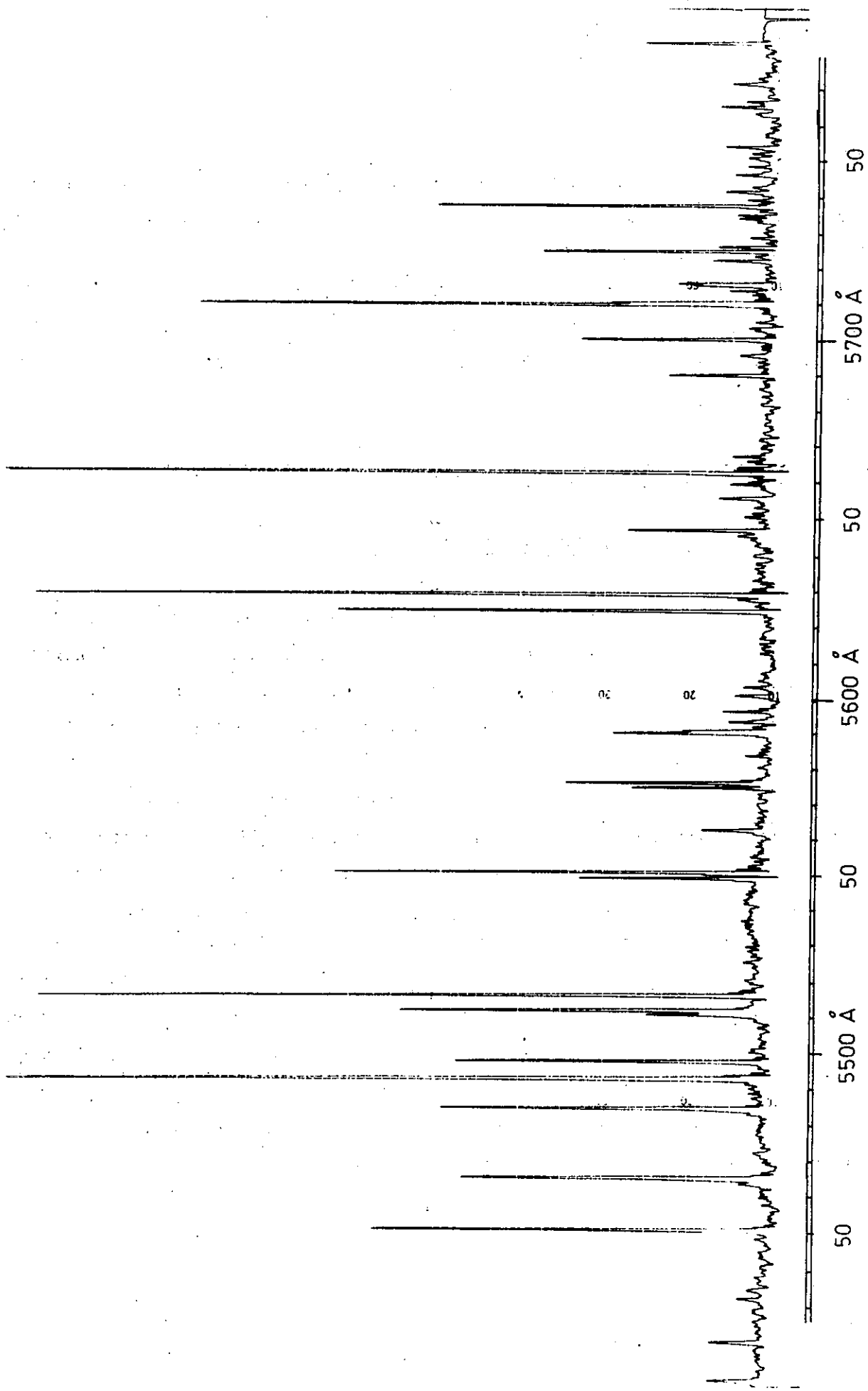


FIG A 8 Spectre obtenu sur montage compensé (samarium)

plus important.

2) on peut dépouiller la plaque en remplaçant le réseau compensé par un miroir, donc avec une source blanche beaucoup plus facile à alimenter et à stabiliser.

Un spectre du SAMARIUM obtenu dans ces conditions est présenté sur la fig. A.8. Sur ce spectre figurent environ un millier d'éléments spectraux au voisinage de $\lambda = 5500 \text{ \AA}$. Le pouvoir de résolution R vaut à peu près 10000.

A - 3 - DESCRIPTION DU MONTAGE ELECTRONIQUE DU DENSITOMETRE:

A - 3.1. SCHEMA D'ENSEMBLE FIG.A- 9.

Le montage comporte les sous-ensembles suivants :

Un oscillateur à crénaux et un diviseur de fréquence donnent respectivement des signaux à 160 Hz et 80 Hz.

Un amplificateur de puissance alimente la bobine du miroir vibrant à 80 Hz.

Un amplificateur à détection synchrone alimente un enregistreur à partir du signal du photomultiplicateur. Il utilise le signal à 160 Hz comme référence car la grille vibre symétriquement par rapport à sa position de coïncidence avec le spectre ce qui donne une fréquence de modulation optique double de la fréquence d'oscillation mécanique.

Un oscillateur à 10 kHz réglable en amplitude attaque par l'intermédiaire d'un deuxième amplificateur de puissance un transformateur suivi d'un pont redresseur qui fournit la haute tension au photomultiplicateur

L'ensemble est alimenté par des tensions stabilisées - 24 V, + 6 V et - 6 V. Le moteur d'entraînement du châssis et la lampe sont alimentés par l'intermédiaire du bâtiier électronique.

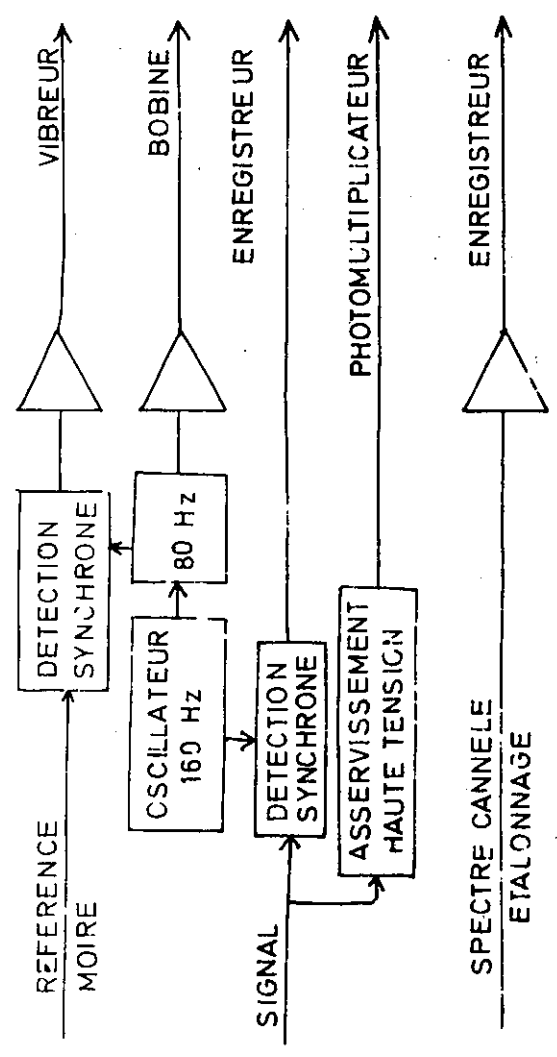
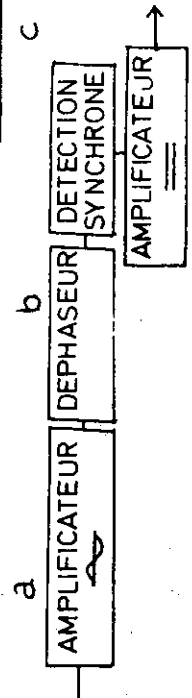
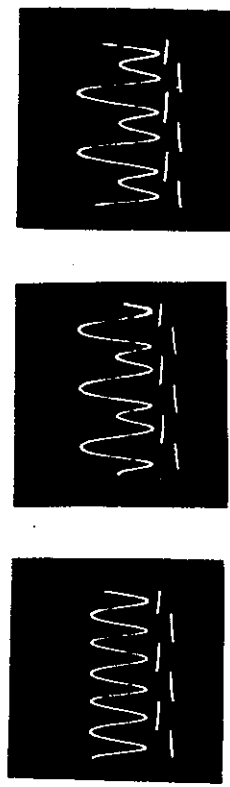


FIG A.9 SCHEMA D'ENSEMBLE

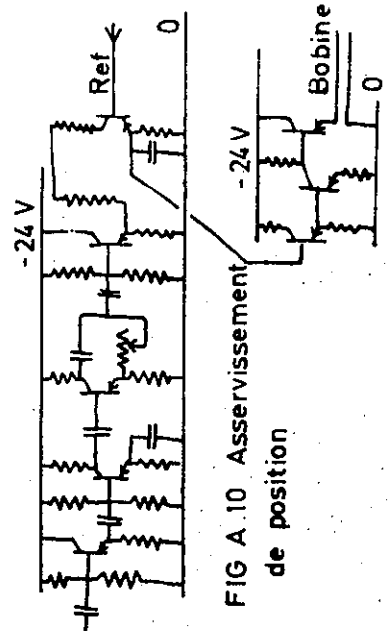


FIG A.10 Asservissement de position

A - 4 - RESULTATS:

A - 4.1. CAS MONOCHROMATIQUE:

D'après notre étude du chapitre IV c'est le cas où l'utilisation de la grille n'apporte pas de gain en temps de pose mais donne un rapport signal sur bruit meilleur qu'une fente.

Le premier point se vérifie aisément. Sans changer le dispositif de conjugaison on obtient pour un même temps de pose la même densité de plaque avec la grille et avec la fente. On peut toutefois remarquer les points suivants :

1 - aux densités faibles l'oeil est beaucoup plus sensible à l'image de la grille d'hyperbole qu'à une fente unique correspondant à la même résolution. L'effet est moins sensible pour une grille du type MORET-BAILLY.

2 - s'il y a défaut de focalisation la densité de l'image de la fente s'affaiblit alors que l'image de la grille devient floue mais garde approximativement la même densité moyenne.

Le gain en rapport signal sur bruit se vérifie bien. La grille que nous avons utilisée fait 28 mm de côté et la largeur de la fonction d'autocorrélation est 70μ (pour un pas de 100μ aux bords de la grille). Par conséquent, $N = 400$ et $G = 10$. Cette valeur se vérifie assez bien sur la figure A.12 sur laquelle on trouve l'enregistrement tiré d'une image de la grille de densité 0,2 pour laquelle ce type de plaque donne avec une fente équivalente un rapport signal sur bruit de l'ordre de 75. Le rapport signal sur bruit mesuré sur cet enregistrement est 800. Il n'est visible qu'avec une amplification importante et suffisamment loin de la raie pour que les pieds de la fonction d'appareil ne soient plus gênants. Cet enregistrement est obtenu à partir d'une grille hyperbolique non apodisée, si ce n'est par les défauts du montage optique.

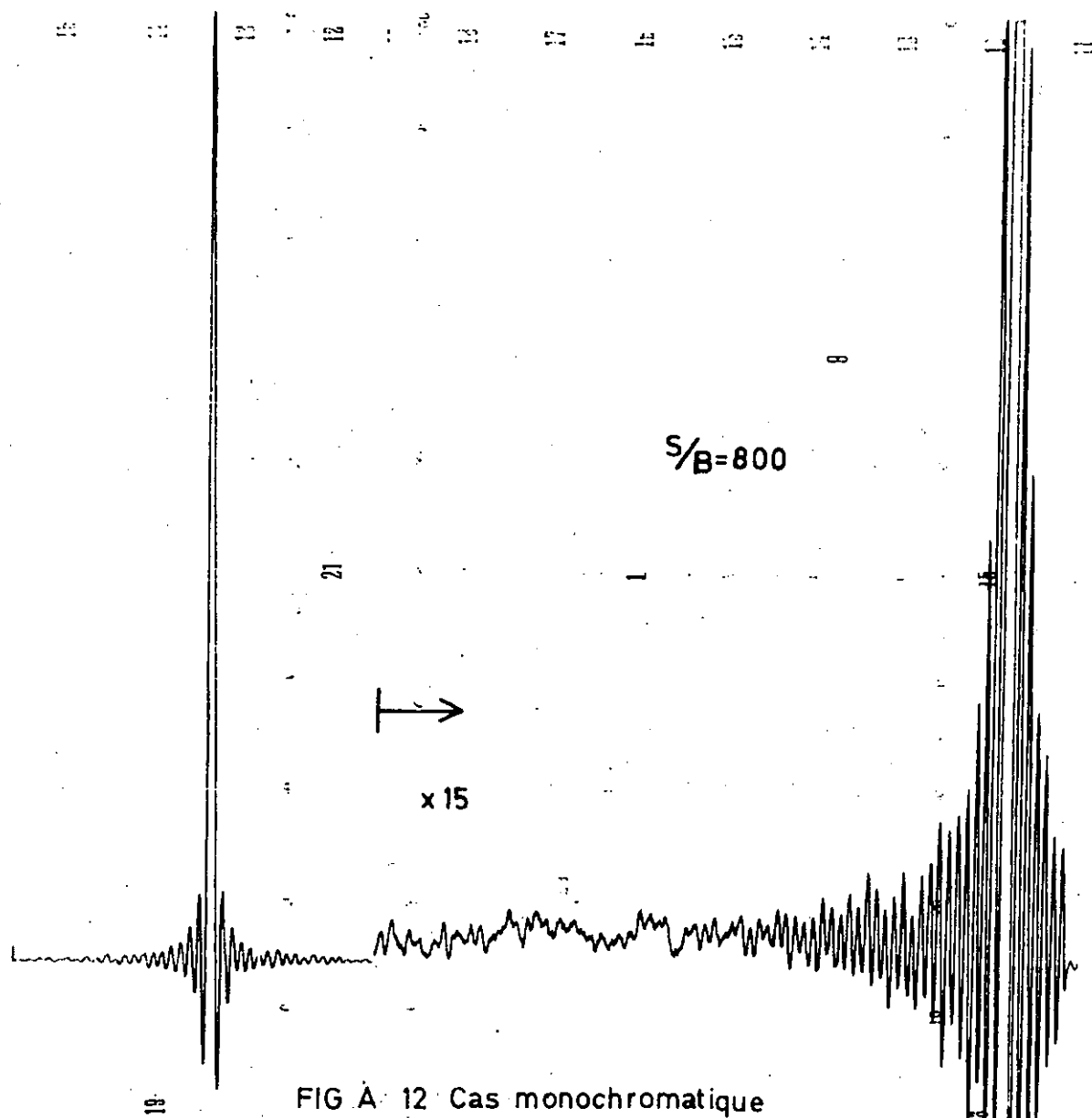


FIG A 12 Cas monochromatique
gain en rapport signal / bruit

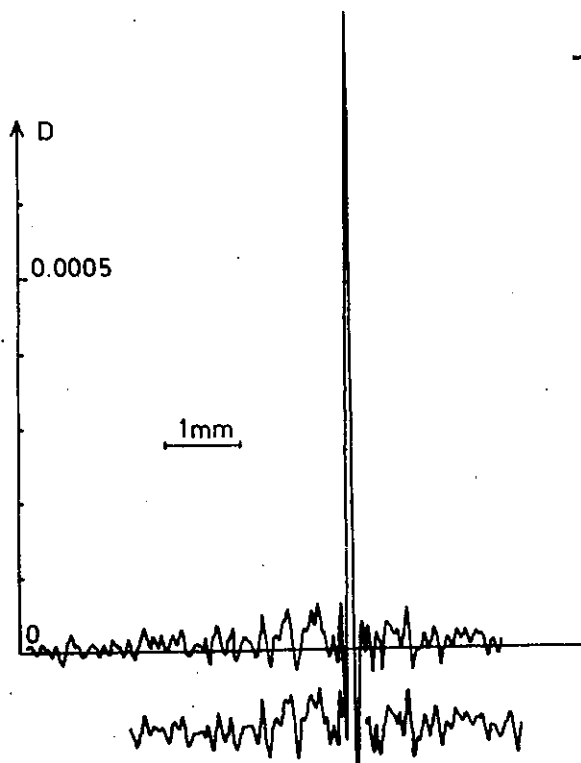


FIG A 14 Détection des faibles densités

Cette diminution du bruit due à la surface importante sur laquelle est intégrée le signal peut aussi se mettre en évidence de la manière suivante: on sait qu'un microdensitomètre est d'autant plus sensible aux poussières, griffes et autres accidents de la gélatine que sa fente de lecture est de faible surface. Ces bruits que l'on peut discriminer par observation directe sont de nature différente de celle du bruit argentique, mais peuvent jouer un rôle non négligeable. La figure A-13 présente les deux enregistrements tirés d'une même plaque avant et après traitement par un outil tranchant,

ainsi qu'une vue de la plaque après ce traitement. On voit à quel point ce procédé de lecture de la plaque est peu sensible aux variations de densité même importantes qui ne sont pas corrélées au dessin de la grille.

Autant de tels accidents passent-ils inaperçus, autant par contre une image de grille de densité très faible pourra donner un signal intense. La figure A-14 donne l'enregistrement obtenu à partir d'une image de grille de densité inférieure à 1/1000. La répétition de l'enregistrement (un des premiers que nous ayons faits) montre que le bruit est reproductible et qu'il provient donc bien du bruit lu par la grille sur la plaque.

A - 4.2 EFFET DE LA NON LINEARITE DE LA CARACTERISTIQUE DE PLAQUE.

Dès que plusieurs images de grilles se superposent en un même point de la plaque survient le problème de la linéarité de la réponse de l'émulsion. D'après notre principe de lecture il faudrait que le coefficient de transmission de l'émulsion développée varie linéairement avec le nombre de

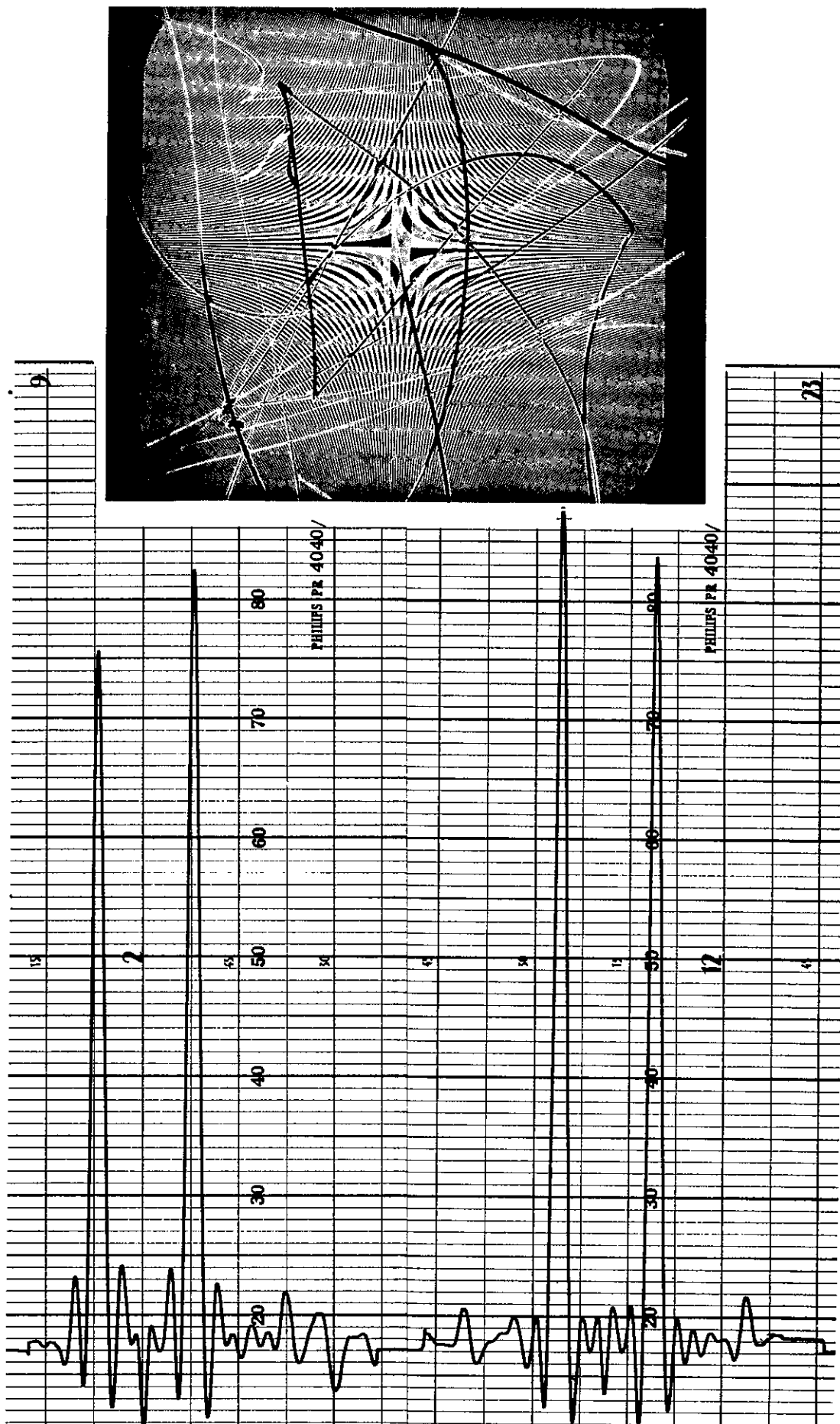
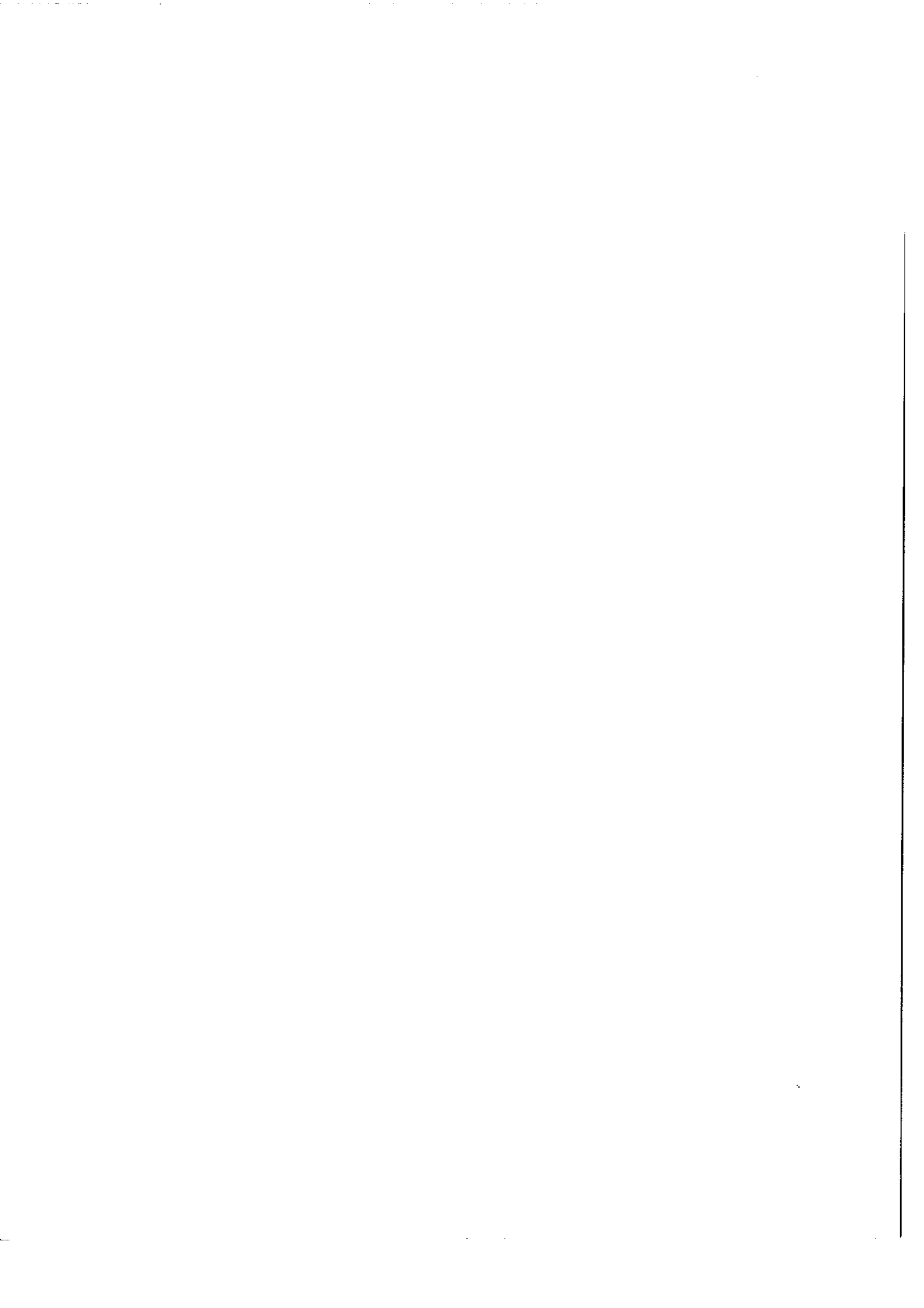


FIG A 13 Insensibilité aux para sites



photons reçus.

Si $G(x,y)$ représente la loi de transmission de la grille centrée en $x = 0, y = 0$, l'éclairement obtenu pour deux images centrées en $x = x_1, y = 0$ et $x = x_2, y = 0$ sera de la forme :

$$E(x,y) = a_1 G(x-x_1, y) + a_2 G(x-x_2, y)$$

Le coefficient de transmission de la plaque développée sera:

$$T(x,y) = k \left[a_1 G(x-x_1, y) + a_2 G(x-x_2, y) \right] + \mathcal{E} \left[a_1 G(x-x_1, y) + a_2 G(x-x_2, y) \right]^2$$

$$T(x,y) = \underbrace{ka_1 G(x-x_1, y) + \mathcal{E} a_1^2 [G(x-x_1, y)]^2}_{T_1} + \underbrace{ka_2 G(x-x_2, y) + \mathcal{E} a_2^2 [G(x-x_2, y)]^2}_{T_2}$$

$$+ \underbrace{2\mathcal{E} a_1 a_2 G(x-x_1, y) \times G(x-x_2, y)}_{T_3}$$

Le dépouillement de la plaque donnera

$$T(x,y) * G(x,y) = T_1 * G(x,y) + T_2 * G(x,y) + T_3 * G(x,y)$$

La fonction $G(x,y)$ étant une fonction qui ne prend que les valeurs 0 et 1 on peut écrire

$$G(x,y)^2 = G(x,y)$$

et chacun des deux premiers termes a la forme de la fonction d'appareil normale avec les amplitudes $a_1(k + \mathcal{E}a_1)$ et $a_2(k + \mathcal{E}a_2)$. Le terme $T_3 * G(x,y)$ par contre est un terme parasite dont la forme et l'amplitude dépendent de $\mathcal{E}, a_1, a_2, x_1$ et x_2 . On voit que son signe dépendra du signe de \mathcal{E} , donc du sens de la concavité de la courbe

$$T = f(n)$$

Nous avons étudié pour différentes valeurs de la densité moyenne de la plaque dans le cas le plus défavorable de deux raies proches, isolées et d'intensités comparables. C'est celui qui conduit à la plus grande excursion le long de la caractéristique et le taux de recouvrement des images (27/28) donne une grande importance aux phénomènes de non linéarité.

Les résultats sont donnés sur la fig. A.15. Sur l'enregistrement a, obtenu à peine au dessus du seuil (la plaque paraît vierge à l'observation visuelle) les termes d'intercombinaison, s'ils existent sont noyés dans le bruit. Sur l'enregistrement b les termes ont la forme de raies négatives, traduisant la concavité positive de la caractéristique Transmission- Eclairement. L'enregistrement c donné par une plaque de densité 0,5 montre des parasites identiques en forme et en position, mais positifs, caractéristiques d'une concavité négative. L'enregistrement d est obtenu pour une densité supérieure à 1. Les termes parasites sont beaucoup plus importants, il en apparaît deux autres et on voit que le rapport signal sur bruit s'est considérablement détérioré. On remarque également une apodisation et un élargissement importants, dus à la diffusion de la lumière dans l'émulsion.

La présence de tels termes parasites serait catastrophique dans un spectre inconnu et un tant soit peu complexe. Il existe bien sûr une densité pour laquelle ces parasites disparaissent, mais il y a peu de chance pour que cette densité corresponde à celle que nous devons respecter pour obtenir le meilleur rendement quantique de l'émulsion.

A - 4.3 SPECTRES DE RAIES:

Dans la pratique se présente rarement ce cas extrême de deux raies intenses, isolées et très proches. Le spectre du néon représenté par la figure A.1. e montre des recouvrements variés d'images d'intensités diverses. L'enregistrement qui en a été tiré est donné par la figure A. 16.

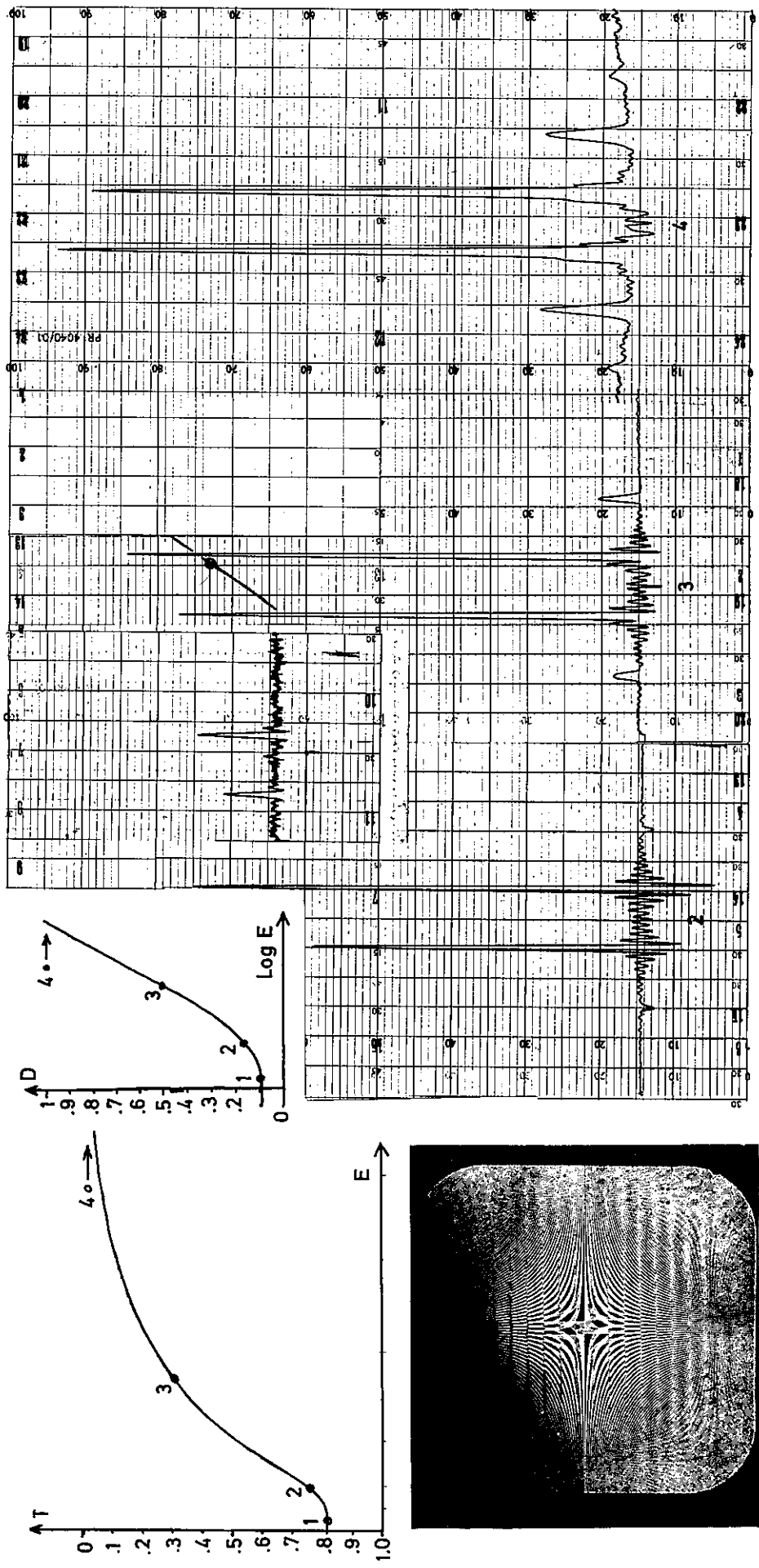
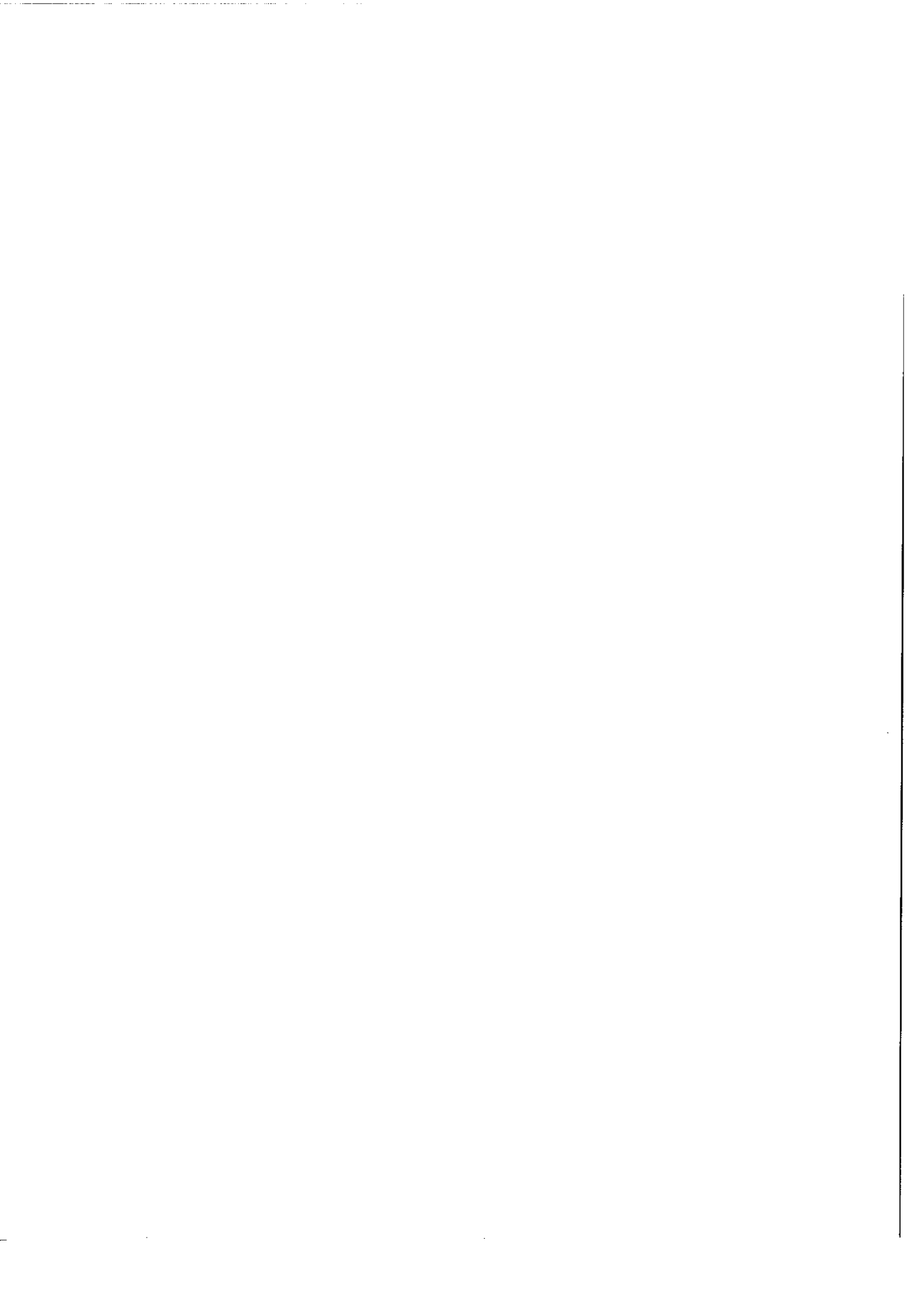


FIG A 15 Effets de non linéarité
étude d'un doublet



Malgré la grande amplitude des variations de densité de la plaque il n'y apparaît comme seul témoin de la non linéarité de la plaque que quelques signaux négatifs situés à égales distances des raies les plus intenses. Mais cet exemple est encore très défavorable : c'est celui d'un spectre peu fourni en raies intenses pour lequel le taux de recouvrement des images de grille est encore faible.

Le cas du spectre du fer est beaucoup plus spectaculaire: comme on peut le constater sur les figures A.1 et A.4 ,la densité de la plaque devient alors très uniforme. (Le point n'est en réalité guère rendu par les reproductions offset pour lesquelles le contraste, déjà augmenté par le tirage des positifs, est très exagéré). Non seulement les termes d'intermodulation ne sont plus visibles, mais l'utilisation de la grille présente, du point de vue de la linéarité de la réponse un avantage sur celle de la fente. La figure A. 17 rend compte de cet effet très intéressant. Les

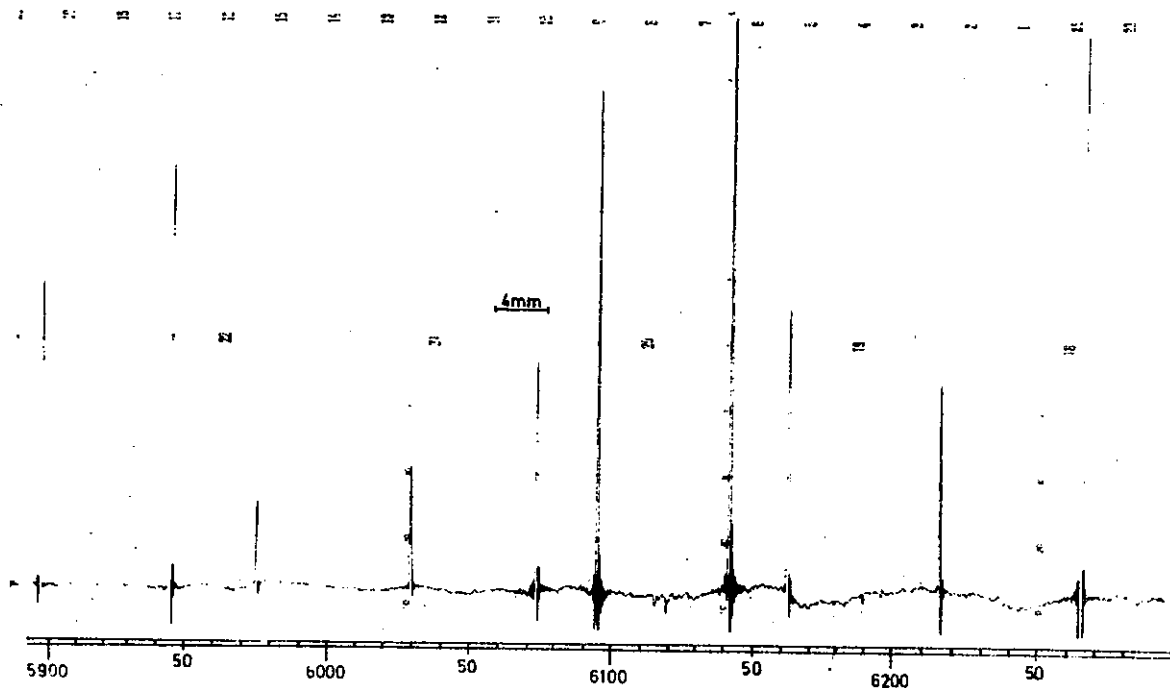
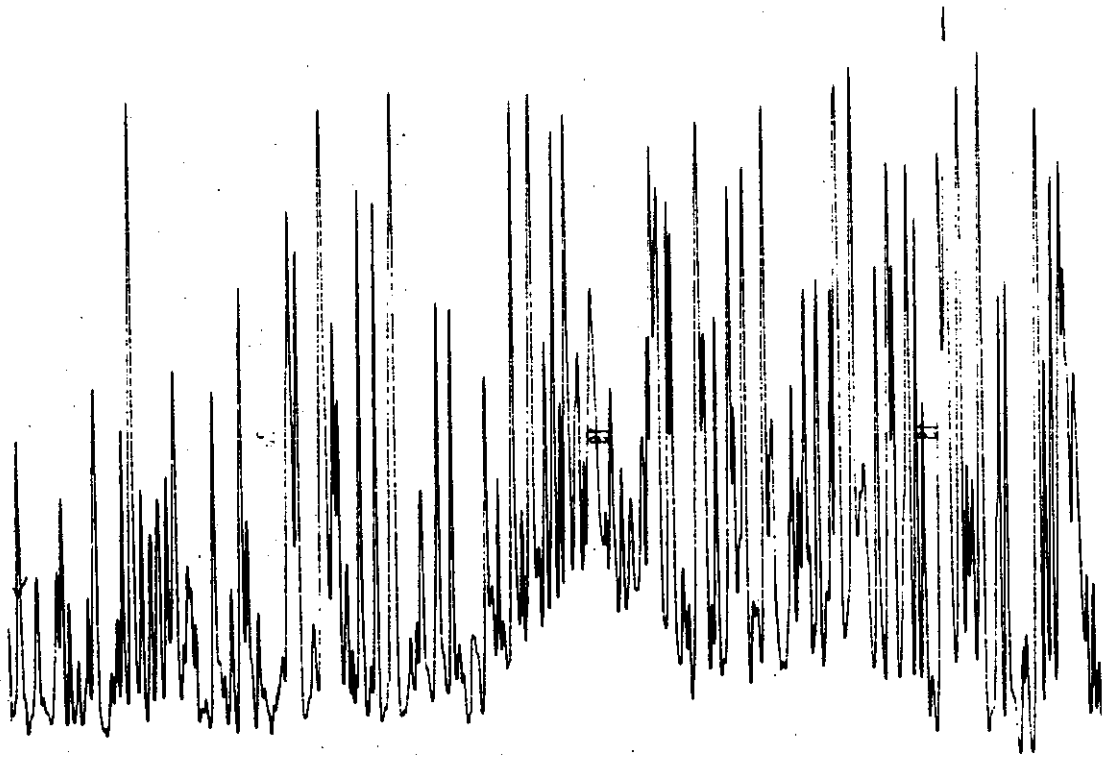
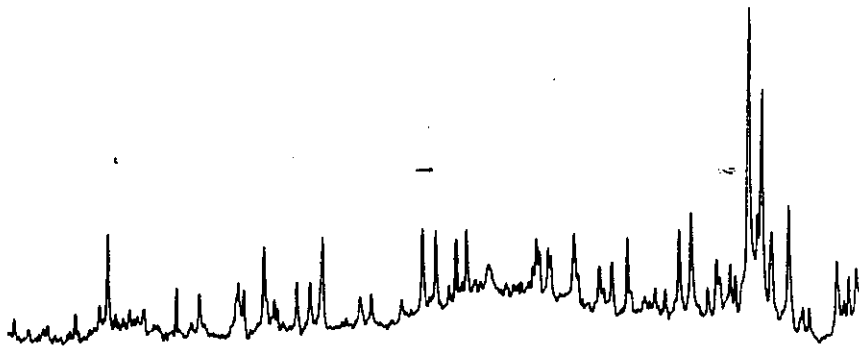


FIG A 16 SPECTRE DU NEON TIRE DE LA FIGURE A 1 e

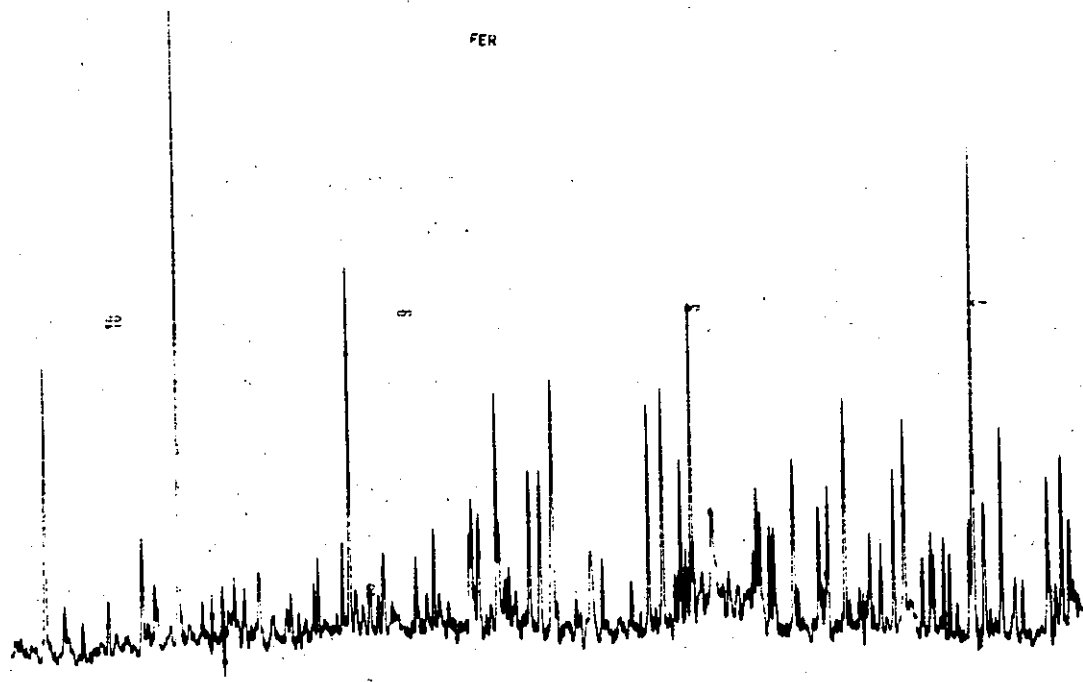


B FENTE Pose 1 heure

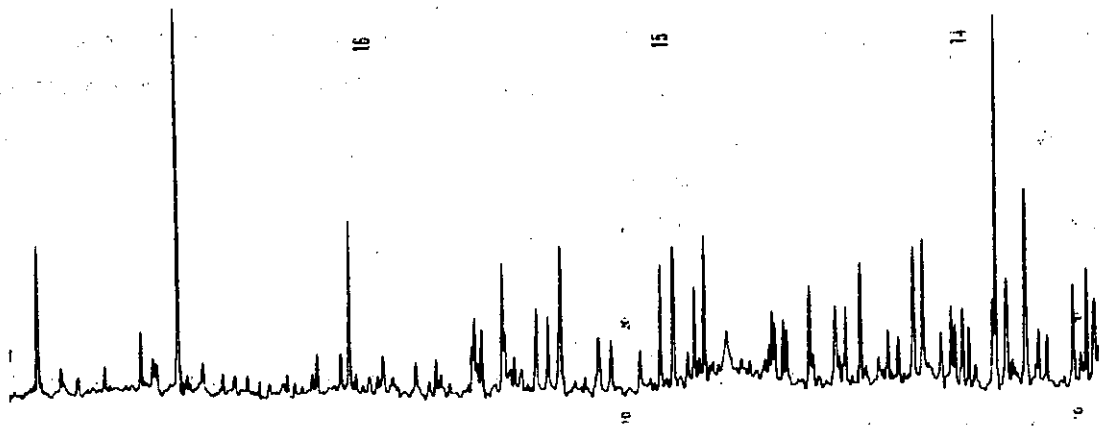


A FENTE Pose 6 minutes
(grandissement légèrement plus faible)

FIG A 17 SPECTRE DU FER



D GRILLE Pose 1 minute



C GRILLE Pose 10 secondes

FIG A17 SPECTRE DU FER

enregistrements a et b obtenus avec une fente montre que des temps de pose allant de 6 mn à 1 heure sont nécessaires pour rendre correctement les différentes raies du spectre. Toutefois aucun de ces temps de pose n'est convenable pour traduire l'ensemble des raies et les deux spectres obtenus dans ces conditions n'ont rien de commun entre eux ni avec l'allure du véritable spectre.

Par contre, les deux spectres obtenus en 10 s et 60 s avec la grille sont identiques et donnent une fidèle représentation des intensités relatives des raies. Cette linéarité de réponse s'explique par la faiblesse des taux de modulation détectés dans l'enregistrement par grille (quelques pour cent pour les raies les plus intenses) alors que l'absorption de ces mêmes raies dans l'enregistrement b dépasse 90 %.

On remarque également sur la figure A. 17 a la présence d'une raie (la plus intense de toutes) qui ne figure pas sur les autres enregistrements. Il s'agit d'une image blanche de la fente due à une réflexion parasite. Cette image existe également sur les plaques prises avec la grille mais comme il y a entre cette image et le spectre un très léger décalage dans la direction perpendiculaire à la dispersion cette image parasite quoique très visible sur la plaque, ne donne lieu à aucune modulation.

A - 5 - CONCLUSION:

L'utilisation d'une grille présente par rapport à la fente des avantages qui dépendent de la nature du spectre étudié.

Lorsque ce spectre est formé d'éléments monochromatiques isolés le gain apporté par la grille est un gain de flux qui se traduit par un gain en rapport signal sur bruit mais, par une ouverture d'objectif donnée, il n'y a aucun gain de temps de pose tant que les images de grille ne se recouvrent pas.

Lorsque le spectre est riche la superposition des images des différents éléments spectraux conduit à un gain en temps de pose mais à une perte équivalente sur le rapport signal sur bruit. C'est en ce sens que la grille n'apporte plus aucun avantage fondamental, ce qui est une conséquence normale de la nature quantique de ce récepteur.

Si dans ce dernier cas, il n'y a pas d'avantage fondamental à utiliser la grille il est d'autres raisons qui rendent son utilisation très intéressante :

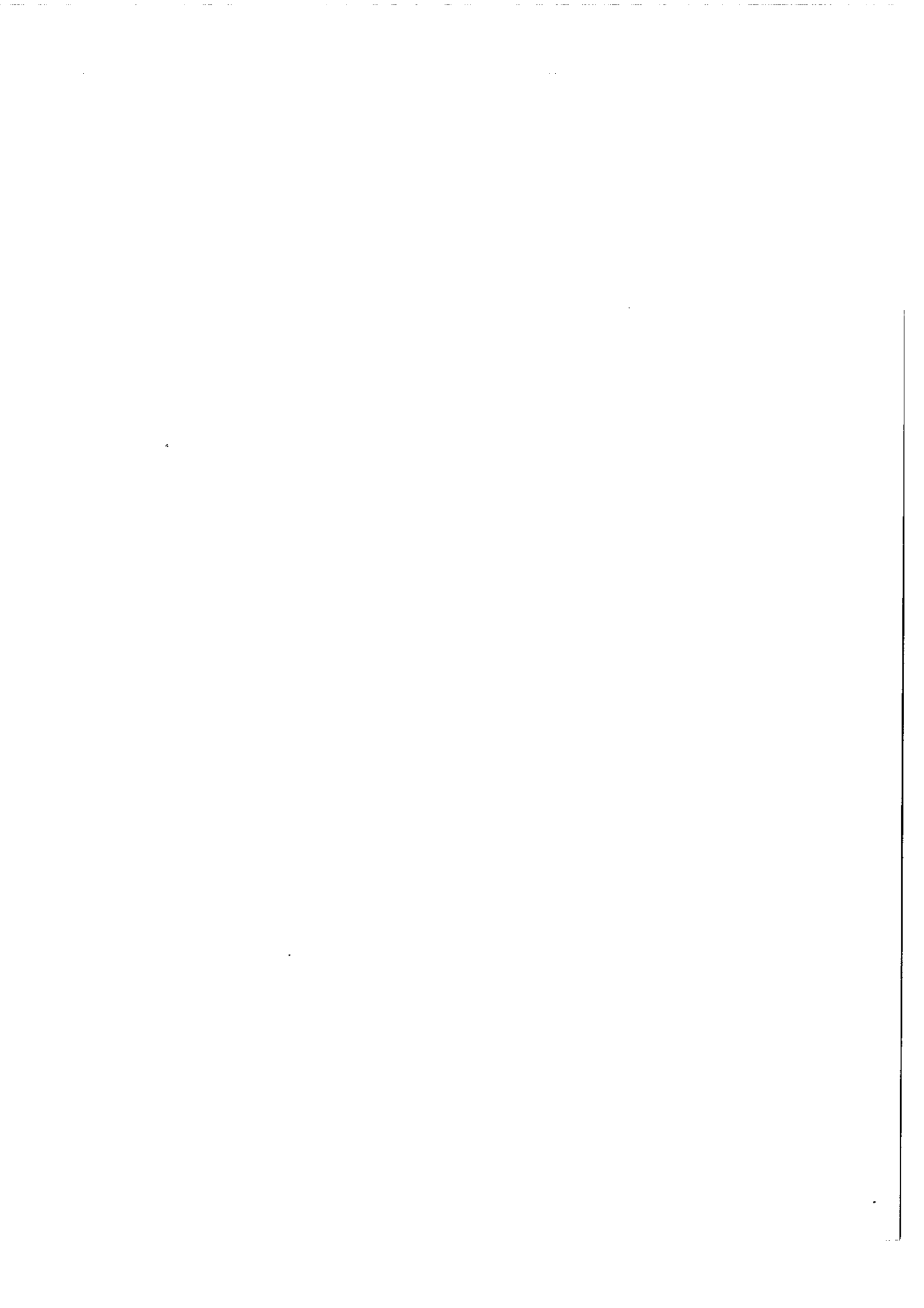
1 - la linéarisation de la réponse donnée par le codage de l'information sur l'émulsion permet de traiter d'un coup un problème à grande dynamique.

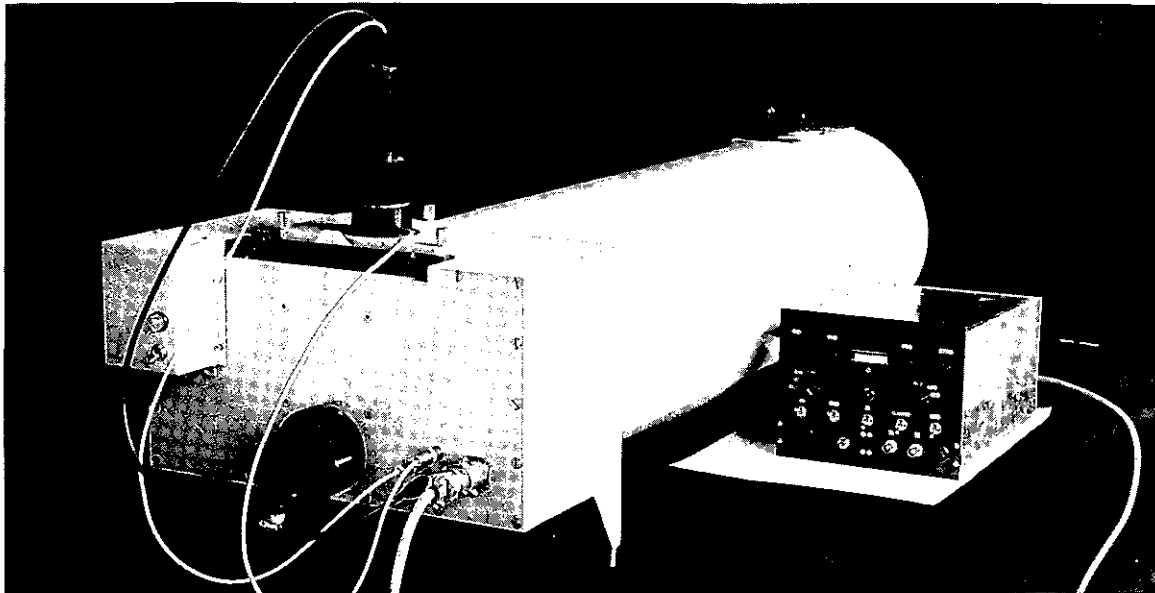
2 - Les comparaisons que nous faisons entre les rapports signal sur bruit supposent que dans tous les cas l'émulsion est utilisée au mieux, c'est-à-dire à une densité D_0 bien précise. Nous avons vu que cette condition est bien respectée sur un spectrogramme à grille, elle ne l'est plus sur un spectre pris avec une fente et bien que le rapport signal sur bruit pour les raies faibles soit meilleur sur l'enregistrement b de la figure A. 17 que sur l'enregistrement c ou l'enregistrement d, cet enregistrement n'est pas vraiment supérieur en qualité aux deux autres. D'autre part l'utilisation par certains de la préexposition montre que dans certains cas l'émulsion est très mal adaptée au travail qu'on lui demande, et une méthode telle que celle que nous venons de décrire doit alors avoir une grande efficacité.

3 - Il est un autre point qui nous est apparu à l'occasion des expériences que nous avons faites avec la grille. La loi de SELWYN n'a en fait jamais été vérifiée (à notre connaissance) pour des surfaces de l'ordre de plusieurs cm^2 que nous avons utilisées et nous croyons qu'une fente simple de telles dimensions ne donnerait pas un rapport signal sur bruit tel que ceux que nous avons obtenu.

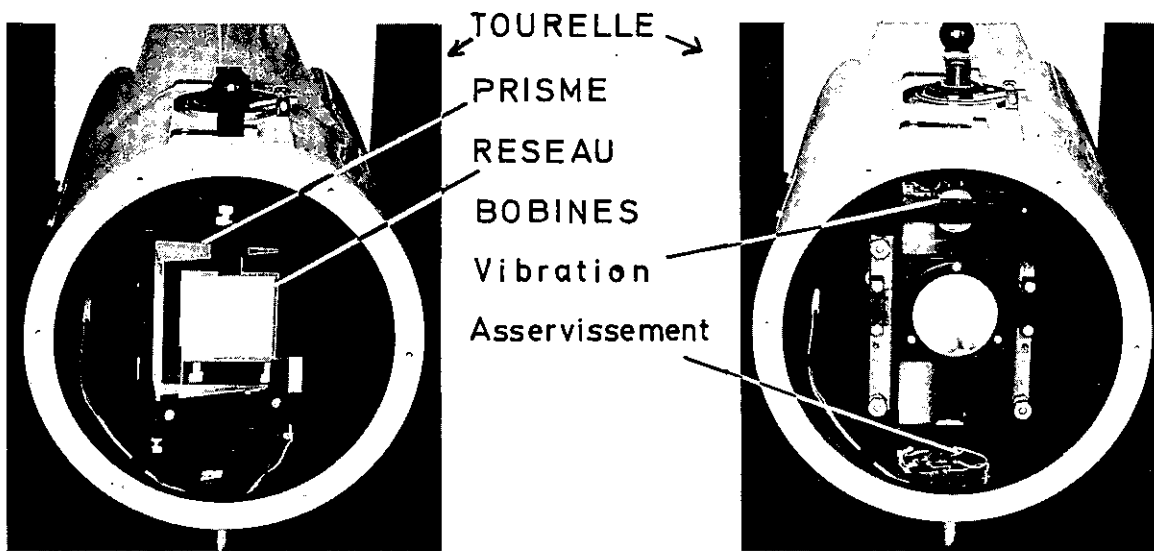
En effet, tout comme une cellule infrarouge présente un bruit anormalement important aux fréquences très basses, les fluctuations lentes de la densité d'une plaque ne permettraient certainement pas la détection de signaux aussi faibles. Nous pensons que la modulation spatiale du signal par la grille et le procédé de microdensitométrie par vibration est en réalité un facteur très favorable à l'obtention d'un bon rapport signal sur bruit tout comme la modulation des flux lumineux infrarouges élimine les composantes basses fréquences du bruit de ces récepteurs.

=====

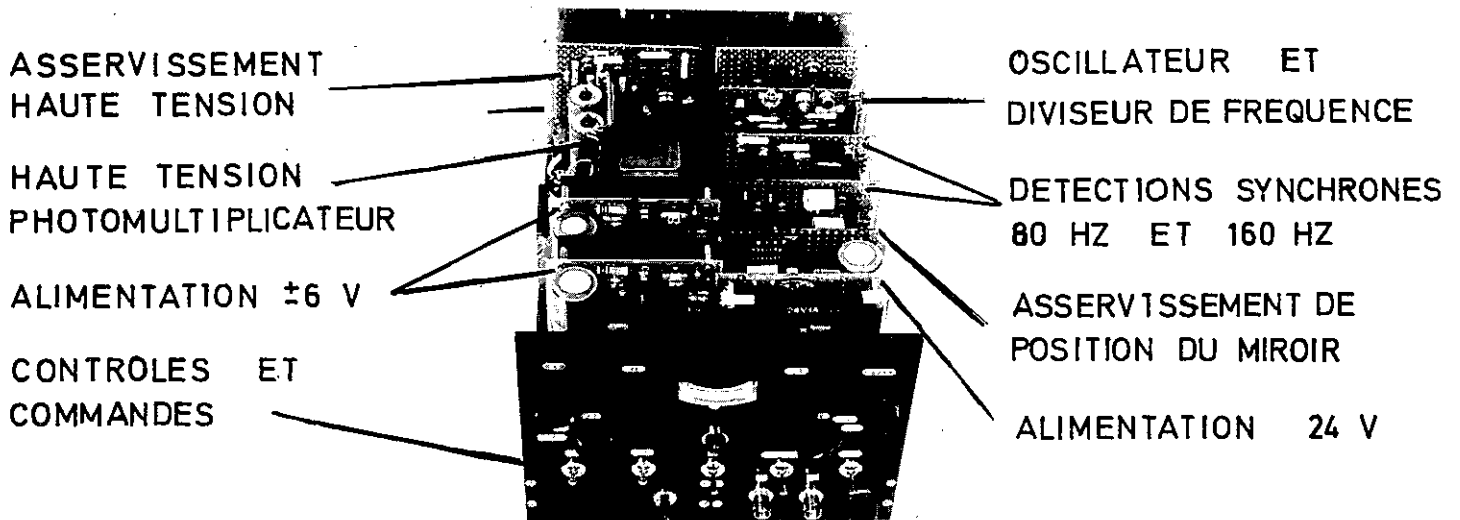




↑ VUE GENERALE DE L APPAREIL ↑



TOURELLE
 PRISME
 RESEAU
 BOBINES
 Vibration
 Asservissement



ASSERVISSEMENT
 HAUTE TENSION

HAUTE TENSION
 PHOTOMULTIPLICATEUR

ALIMENTATION ± 6 V

CONTROLES ET
 COMMANDES

OSCILLATEUR ET
 DIVISEUR DE FREQUENCE

DETECTIONS SYNCHRONES
 80 HZ ET 160 HZ

ASSERVISSEMENT DE
 POSITION DU MIROIR

ALIMENTATION 24 V

FIG A 18 LE SPECTROGRAPHE REOSC

VUE GENERALE DE L'APPAREIL

L'appareil construit par la Société R.E.O.S.C utilise un réseau d'angle de blaze 30° monté avec un objectif de 900 mm de distance focale et de 90 mm de diamètre. La grille, du type MORET-BAILLY fait 30 mm de côté pour une limite de résolution d'environ 100 microns. La lecture du spectre peut s'effectuer sur une longueur de 80 mm, ce qui permet d'explorer un domaine de 450 \AA avec une limite de résolution de $0,5 \text{ \AA}$. On peut enregistrer deux spectres sur une plaque de format standard $9 \times 12 \text{ cm}$.

Sur la figure A - 18 l'appareil est représenté en position de lecture (le schéma optique de la partie avant est donné sur la figure A-19).

Deux vues de la tourelle après démontage du fond de l'appareil montrent l'une le réseau et son prisme compensateur, l'autre le miroir utilisé à la lecture et les deux électro-aimants (vibration et asservissement de position).

Une vue générale du boîtier électronique montre la disposition des différents organes que nous avons décrits.

PHOTOMULTIPLICATEUR
PHOTODIODES

SPECTRE CANNELE

RESEAU DE
MOIRE

CONDENSEURS
SPHERO PARABOLIQUES

AXE OPTIQUE

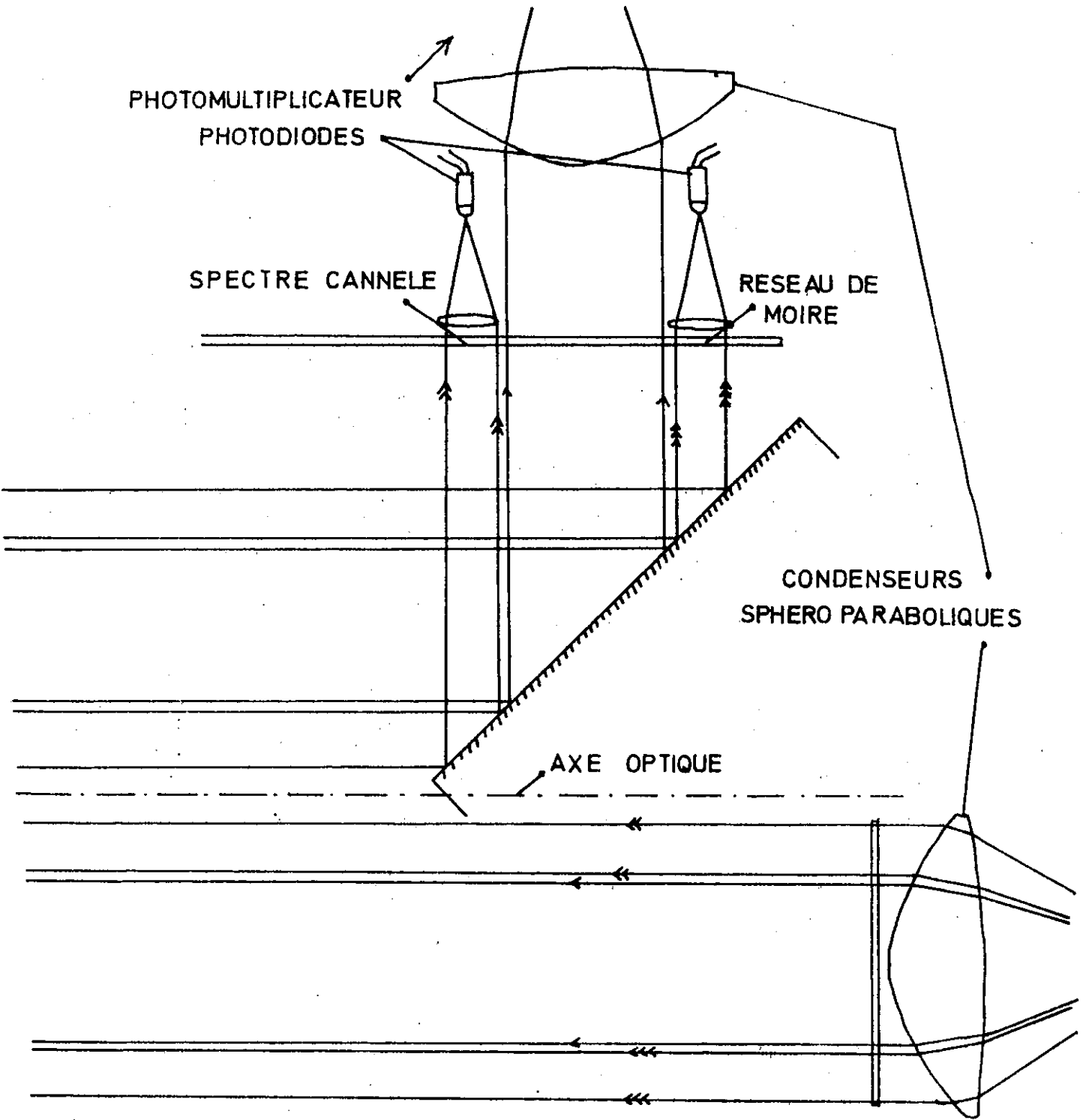


FIG A - 19

R E M E R C I E M E N T S

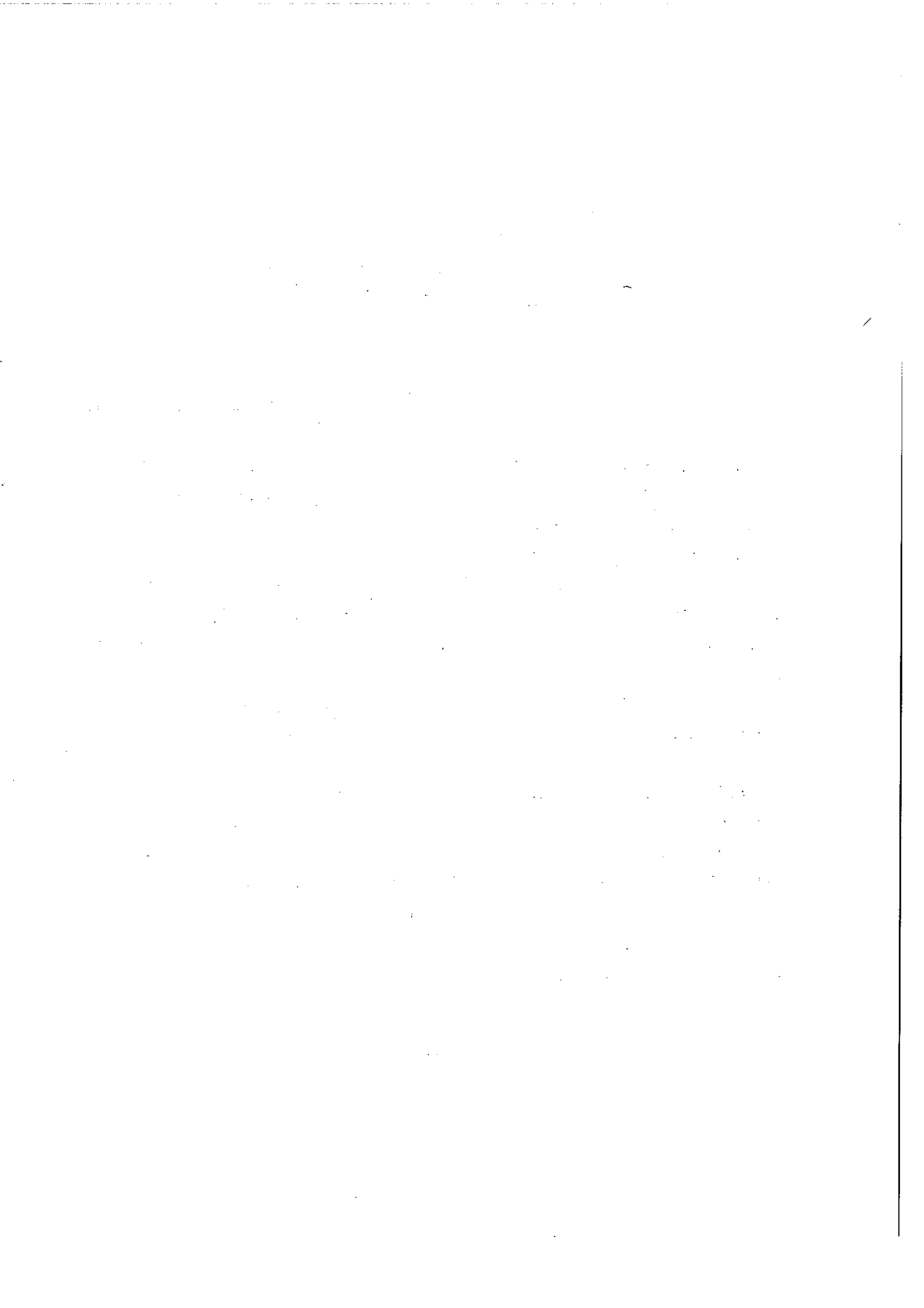
Je remercie très vivement tous ceux qui m'ont permis d'accomplir ma tâche dans de bonnes conditions. Tout d'abord je remercie Monsieur P. Jacquinet qui m'a accueilli dans son laboratoire et qui a pris la responsabilité de mon travail. Je remercie également Monsieur R. Chabbal qui a pris la relève de ma conduite pendant l'absence de Monsieur P. Jacquinet appelé à de plus hautes fonctions.

Toute ma reconnaissance va également à Monsieur P. Connes qui, après m'avoir fait débiter au laboratoire m'a toujours aidé dans mes difficultés bien que mes recherches soient assez éloignées de ses préoccupations.

Je remercie également Monsieur A. Girard qui m'a accordé de longs entretiens chaque fois que je lui en ai exprimé le désir.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Bayle, directeur de la société R.E.O.S.C. grâce à qui un prototype de spectrographe à grille a été construit. Je remercie très vivement à ce propos Monsieur Espiard, Monsieur Benoit et le personnel de la société R.E.O.S.C. qui m'ont facilité à l'extrême la réalisation et la mise au point de cet appareil.

Je remercie enfin tout le personnel technique, administratif et scientifique du laboratoire Aimé Cotton dont la collaboration a été nécessaire et fructueuse.



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

888888

- [1] P.JACQUINOT Jour. Phys. Rad. 19,223 (1958)
- [2] R.CHABBAL Thèse, Editions de la revue d'optique PARIS (1958)
- [3] P.CONNES Jour. Phys. Rad. 19,262 (1958)
- [4] A.GIRARD Appl. Opt. 2,1,79 (1963)
- [5] R.PRAT Opt. Act. à paraître
- [6] J.CONNES Rev. Opt. 40,45(1961)
- [7] J.F.GRAINGER, J.RING, J.H.STELL Jour. Phys. 28,C2,44 (1967)
- [8] M.J.SELBY, L.W.THORPE Jour. Phys. 28,C2,144 (1967)
- [9] P.CONNES Jour. Phys. Rad. 19,233 (1958)
- [10] P.CONNES Rev. Opt. 35,37 (1958)
- [11] P.BOUCHEINE, P.CONNES Jour. Phys. 24,134 (1963)
- [12] R.C.JONES Phot. Sci. Eng. 2,57 (1958)
- [13] R.C.JONES Advances in Electronics V Ac. Pr. New York (1953)
- [14] J.G.HIRSCHBERG Jour. Phys. 28,C2,226 (1967)
- [15] J.KATZENSTEIN Appl. Opt. 5,263 (1965)
- [16] Photographic Plates for Scientific and Technical Use. Eastman Kodak Cy p.11 Rochester (1948)
- [17] E.W.H.SELWYN Phot. Jour. 75,571 (1935)
- [18] H.J.ZWEIG Jour. Opt. Soc. Am. 46,812 (1956)
- [19] SILBERSTEIN Jour. Opt. Soc. Am. 31,342 (1941)
- [20] J.H.WEBB Jour. Opt. Soc. Am. 31,355 (1941)
- [21] P.B.FELLGETT Month. Not. Roy. Astr. Soc. 118,395 (1958)

- [22] J.C.MARCHAND Jour. Soc. Am. 54,798 (1964)
- [23] P.B.FELLGETT Jour. Phot. Sc. 9,201 (1961)
- [24] P.BOUCHEINE Opt. Act. à paraître.
- [25] G.W.STROKE Jour. Phys. 28,C2,196 (1967)
- [26] S.LOWENTHAL Optics Communications à paraître.
- [27] K.KAMIYA,K.YOSHIHARA,K.OKADA Japan. J. Appl. Phys. 7,1129 (1968)
- [28] G.GUELACHVILI,J.P.MAILLARD Communication au congrès d'ASPEN
(Colorado,Mars 1970)
- [29] P.BOUCHEINE,R.CHABBAL, Communication au congrès d'ASPEN(Colorado
Mars 1970)
- [30] R.CHABBAL,P.BIED-CHARRETON,R.PELLETIER Jour. Phys. 28,C2,209 (1967)
- [31] G.MONNET Jour. Phys. 28,C2,194 (1967)
- [32] J.MORET-BAILLY Opt. Act. à paraître.
- [33] P.BOUCHEINE,P.JACQUINOT Jour. Phys. 28,C2,183 (1967)
- [34] J.SERRES Thèse de 3ème Cycle,ORSAY,MARS 1970

