



UNIVERSITÉ D'OTTAWA
UNIVERSITY OF OTTAWA

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA DIFFRACTION DE LA LUMIERE
EN VUE D'UNE ANALYSE COMPAREE DES THEORIES DE FRESNEL ET YOUNG

par

Raymond Boyer

Thèse présentée en vue de l'obtention du
grade de Maître ès Sciences Physiques

Département de Physique
Faculté des Sciences et de Génie
Université d'Ottawa,
Ottawa, Canada,

1972

A Mado

SOMMAIRE

En optique des radiations visibles, plusieurs théories de la diffraction de la lumière ont été proposées. Deux d'entre elles retiennent ici notre attention, celle de Young et celle de Fresnel. Bien que ces deux théories soient basées sur des concepts nettement différenciés, elles conduisent toujours à des valeurs numériques voisines lorsqu'on les utilise pour calculer l'intensité lumineuse dans des figures de diffraction. Cependant, on peut réaliser des figures de diffraction telles que l'écart entre les valeurs numériques calculées à partir de l'une et l'autre des deux théories excède l'erreur expérimentale sur les mesures photométriques effectuées sur ces figures de diffraction. Il devient alors possible de déterminer laquelle des deux théories correspond le mieux à la réalité expérimentale.

Dans cette thèse on a opté pour la diffraction d'une onde sphérique de lumière monochromatique par un bord rectiligne tranchant; en effet, dans certaines des figures de diffraction ainsi formées, on observe des franges sur la position desquelles les deux théories ne s'accordent pas. Le principe de l'expérience se résume à ce qui suit. Sur un banc d'optique sont montés successivement une source ponctuelle de lumière monochromatique, un écran limité par un bord rectiligne tranchant et une plaque photographique. Les positions relatives de la source, du bord diffringent et de la plaque sont déterminées au moyen de techniques de mesure spécialement développées pour satisfaire aux conditions requises de haute précision

expérimentale. Sur la plaque photographique, on enregistre la figure de diffraction formée par le faisceau de lumière émis par la source et diffracté par le bord de l'écran. L'enregistrement photographique est analysé et une courbe de l'intensité lumineuse suivant un axe transversal de la figure de diffraction est enregistrée sur papier graphique. Une technique spéciale utilisant un interféromètre de Michelson et un système électronique associé permet de localiser avec précision le centre des franges de diffraction et de mesurer les interfranges qui sont comparés aux valeurs numériques calculées à partir des deux théories considérées.

Les résultats obtenus montrent que c'est la théorie de Fresnel qui s'accorde le mieux avec la réalité expérimentale.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude au Dr. Guy Lansraux qui a bien voulu accepter de diriger mes travaux de recherche. Son aide a été vivement appréciée; notamment ses nombreuses suggestions m'ont permis d'augmenter la précision des mesures et d'améliorer les techniques d'analyse.

Je tiens aussi à remercier M. Martial Ranger qui m'a montré diverses techniques d'atelier et qui m'a assisté lors de la fabrication de plusieurs pièces d'équipement. Mes remerciements s'adressent aussi au Dr. B. Whitford pour son assistance dans le domaine de l'électronique et à M. Robert Léonard pour ses conseils relatifs à l'utilisation de l'interféromètre de Michelson.

TABLE DES MATIERES

	PAGE
CHAPITRE 1. INTRODUCTION.	1
CHAPITRE 2. THEORIE.	
2.1 Théorie de Fresnel.	3
2.2 Théorie de Young.	6
a) Franges d'interférence dans la figure de diffraction d'un masque à bords rectilignes et parallèles.	6
b) Diffraction par un bord tranchant.	9
c) Calcul d'erreur.	10
CHAPITRE 3. ETUDE EXPERIMENTALE.	
3.1 Choix de conditions expérimentales.	12
3.2 Formation de la figure de diffraction et de son enregistrement photographique.	17
3.3 Analyse des plaques photographiques au moyen de l'interféromètre de Michelson.	21
3.4 Analyse de l'enregistrement graphique.	26
3.5 Dernière amélioration et résultats définitifs.	34
CHAPITRE 4.	
4.1 Discussion.	45
4.2 Conclusion.	52
APPENDICE I. Polynomes de Chebyshev.	54
APPENDICE II. Programme sur ordinateur pour les calculs théoriques et le traitement des données expérimentales.	56

	PAGE
APPENDICE Ia.	55
BIBLIOGRAPHIE	79

LISTE DES FIGURES

	PAGE
Figure	
2.1 Diffraction par une ouverture rectangulaire.	4
2.2 Diffraction par un masque à bords rectilignes et parallèles.	7
2.3 Diffraction par un bord.	9
3.1 Schéma du montage sur le banc d'optique.	17
3.2 Interféromètre de Michelson.	22
3.3 Schéma d'un défaut d'orientation de la platine mobile de l'interféromètre.	23
3.4 Méthode graphique, dite de convergence, pour localiser le centre d'une frange.	30
3.5 Localisation du centre d'une frange, courbe théorique.	32
3.6 Localisation du centre d'une frange, courbe expérimentale.	33
3.7 Photographie de la double figure de diffraction formée par un bord rectiligne diffringent selon la méthode décrite dans le texte, section 3.5.	39
3.8 Interféromètre de Michelson avec système électronique associé.	40

	PAGE
Figure	
3.9 Platine mobile de l'interféromètre et unité d'analyse microphotométrique.	41
3.10 Système optique pour former et photographier la figure de diffraction.	42
3.11 Unité optique pour mesurer les distances sténopé-masque et masque-plaque photographique.	43
3.12 Echantillon de la courbe de densité optique.	44
4.1 Ecart entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées d'après les théories de Young et Fresnel.	51

LISTE DES TABLEAUX

	PAGE
Tableau	
I Positions des franges relativement à la limite géométrique ombre-lumière et valeurs des interfanges dans la figure de diffraction d'un demi-plan pour différentes valeurs de la distance b entre le demi-plan diffringent et le plan d'observation.	14
II Diffraction par un demi-plan, calculs théoriques et résultats expérimentaux (enr. # 5).	36
III Diffraction par un demi-plan, calculs théoriques et résultats expérimentaux (enr. # 4).	37
IV Localisation du centre d'une frange, comparaison des deux méthodes.	38
V Tableau analytique des diverses causes d'erreur (enr. # 4).	50

CHAPITRE I.

INTRODUCTION

Le phénomène de la diffraction de la lumière est connu depuis très longtemps; il a été étudié dès le 17^{ie} siècle par des chercheurs comme Grimaldi (1618-1663), Huygens (1629-1695), Newton (1642-1727). Newton était un partisan de la théorie corpusculaire de la lumière et c'est malheureux car son influence fut si grande sur le monde scientifique qu'il fallut attendre près de cent ans avant que l'on ose le contredire. Parmi ceux qui s'y risquèrent, mentionnons Thomas Young (1773-1829) et Augustin Fresnel (1788-1827).

Nous devons à Young une importante contribution au concept d'interférence des ondes lumineuses. A la suite d'études sur les phénomènes acoustiques il a supposé que tout comme le son, la lumière pouvait produire des phénomènes d'interférence bien que sur une échelle complètement différente. Young a réussi à produire en laboratoire des figures d'interférence ainsi qu'il l'avait prévu. La théorie corpusculaire de Newton n'apportait aucune explication pour ces phénomènes tandis que le principe de la superposition des ondes que Young proposait, les expliquaient complètement. Il fut donc celui qui a fait revivre la théorie des ondes introduite par Huygens et combattue par Newton. Lorsque Young s'attaqua au phénomène de la diffraction de la lumière, il s'aperçut que celui-ci pouvait être

expliqué par la superposition sur l'onde incidente d'une onde de diffraction qui semblait provenir du bord de l'objet diffringent; cette onde étant déphasée de 180° par rapport à l'onde incidente.

Presqu'indépendamment de Young, Fresnel, un ingénieur des ponts et chaussées, se consacra aussi à l'étude de la diffraction de la lumière. Appliquant le principe d'Huygens au front d'onde, il en vint à considérer que l'état lumineux en un point de la figure de diffraction peut être déterminé en supposant que chaque point du front d'onde dans la pupille de diffraction émet des ondelettes auxquelles on applique le principe de superposition. Il concevait que les phénomènes d'interférence et de diffraction étaient étroitement associés; la diffraction ne pouvant se concevoir sans l'interférence d'un nombre infini de sources lumineuses, centres des ondelettes d'Huygens sur le front d'onde de la pupille.

Il semble donc de prime abord que la théorie de la diffraction telle qu'elle fut conçue par Young et celle que nous a donnée Fresnel sont très différentes. La première considère que la figure de diffraction résulte de la composition des ondes incidentes et des ondes de diffraction provenant du bord de l'objet diffringent; tandis que l'autre, celle de Fresnel, veut que ce soit la somme des contributions de tous les points du front d'onde dans le plan de la pupille. Qui a raison?

La réponse à cette question constitue le projet de recherche qui m'a été confié par Dr. Lansraux en vue de l'obtention d'une maîtrise en physique.

CHAPITRE 2

THEORIE

2.1 Théorie de Fresnel

Fresnel a dérivé sa théorie à partir du principe d'Huygens. On peut trouver une dérivation analogue dans le livre de Rossi¹. Dans la plupart des volumes tels Born & Wolf², Klein³, on adopte la méthode plus rigoureuse qui a été développée par Kirchhoff. Ce dernier, partant du théorème de Green lequel exprime la conservation du champ lumineux dans une région donnée de l'espace, dérive une expression communément appelée formulation de Kirchhoff, qui est l'équivalent mathématique rigoureux du principe d'Huygens. Ensuite, en faisant une série d'approximations parfaitement justifiables dans la majorité des cas en lumière visible, i.e. longueur d'onde très petite par rapport aux distances source-pupille, pupille-écran, etc...., il obtient une expression analogue à celle que Fresnel avait obtenue.

Nous traiterons ici uniquement le cas de la diffraction d'une onde scalaire. Dans les cas de la représentation vectorielle, comme c'est le cas de la lumière polarisée, la même théorie s'applique à chacune des composantes de la vibration lumineuse. Nous allons maintenant donner les équations obtenues dans le cas de la diffraction

d'une onde sphérique par une ouverture rectangulaire. Le lecteur est référé aux ouvrages classiques tels ceux de Born & Wolf² ou Klein³ pour la dérivation de ces expressions.

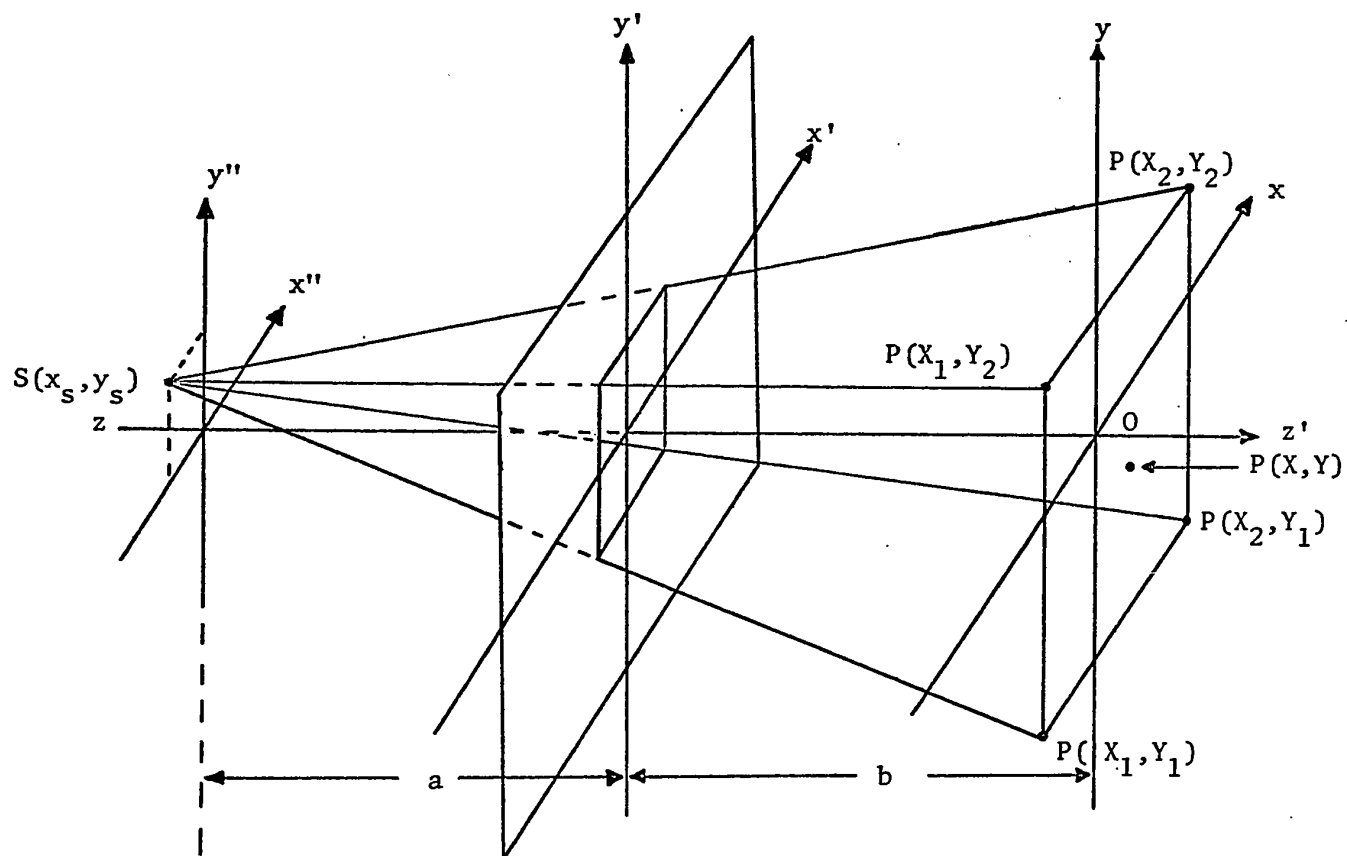


Figure 2.1 Diffraction par une ouverture rectangulaire

L'amplitude complexe de l'état lumineux dans le plan d'observation est donnée par:

$$E(P) = \frac{i}{2} E_{\text{inc.}}(P) \int_{\eta_{x_1}}^{\eta_{x_2}} \exp \left[-\left(\frac{\pi i}{2}\right) \eta_x^2 \right] d\eta_x \int_{\eta_{y_1}}^{\eta_{y_2}} \exp \left[-\left(\frac{\pi i}{2}\right) \eta_y^2 \right] d\eta_y \quad (2.1)$$

où les équations $x' = x_1$, $x' = x_2$, $y' = y_1$ et $y' = y_2$ déterminent les bords de l'ouverture rectangulaire. $E(P)$ est l'amplitude lumineuse en un point $P(X,Y)$ dans le plan d'observation. $E_{\text{inc.}}(P)$ est l'amplitude lumineuse en $P(X,Y)$ lorsque le diaphragme rectangulaire est enlevé. Les variables η_x et η_y sont des grandeurs sans dimension que l'on définit comme suit;

$$\eta_x = \left(\frac{x-X}{Q}\right), \quad \eta_y = \left(\frac{y-Y}{Q}\right) \quad (2.2)$$

$$Q = \left[\frac{\lambda b (a+b)}{2a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

x et y étant des coordonnées définies dans le plan d'observation. Les limites d'intégration X_1 , X_2 , Y_1 et Y_2 sont les projections coniques des bords de l'ouverture dans le plan d'observation.

$$\begin{aligned} X_1 &= \left(\frac{a+b}{a}\right) x_1 - \frac{b}{a} x_s \\ Y_1 &= \left(\frac{a+b}{a}\right) y_1 - \frac{b}{a} y_s \end{aligned} \quad (2.4)$$

L'équation (2.1) a été obtenue après plusieurs approximations. On a supposé que la source lumineuse est ponctuelle, que les distances a et b sont très grandes par rapport à la longueur d'onde, que l'intensité lumineuse est à peu près constante partout dans la pupille de diffraction et que le point d'observation $P(X,Y)$ n'est pas trop éloigné de l'origine O afin que le facteur d'inclinaison soit à peu près égal à l'unité.

2.2 Théorie de Young

La théorie de Young, comme nous l'avons déjà mentionné, suppose que la figure de diffraction est formée par la superposition d'ondes incidentes et d'ondes de diffraction qui sont émises par les bords de l'objet diffringent et qui sont retardées d'une demie longueur d'onde par rapport aux ondes incidentes. Cette théorie nous permet de calculer avec une grande facilité la position des extréma d'intensité lumineuse dans la figure de diffraction.

a) Franges d'interférence dans la figure de diffraction d'un masque à bords rectilignes et parallèles.

Considérons le cas d'ondes sphériques de lumière monochromatique λ , issues d'une source S et diffractées par un masque à bords rectilignes et parallèles de largeur l , placé à une distance

a de cette source (Fig. 2.2).

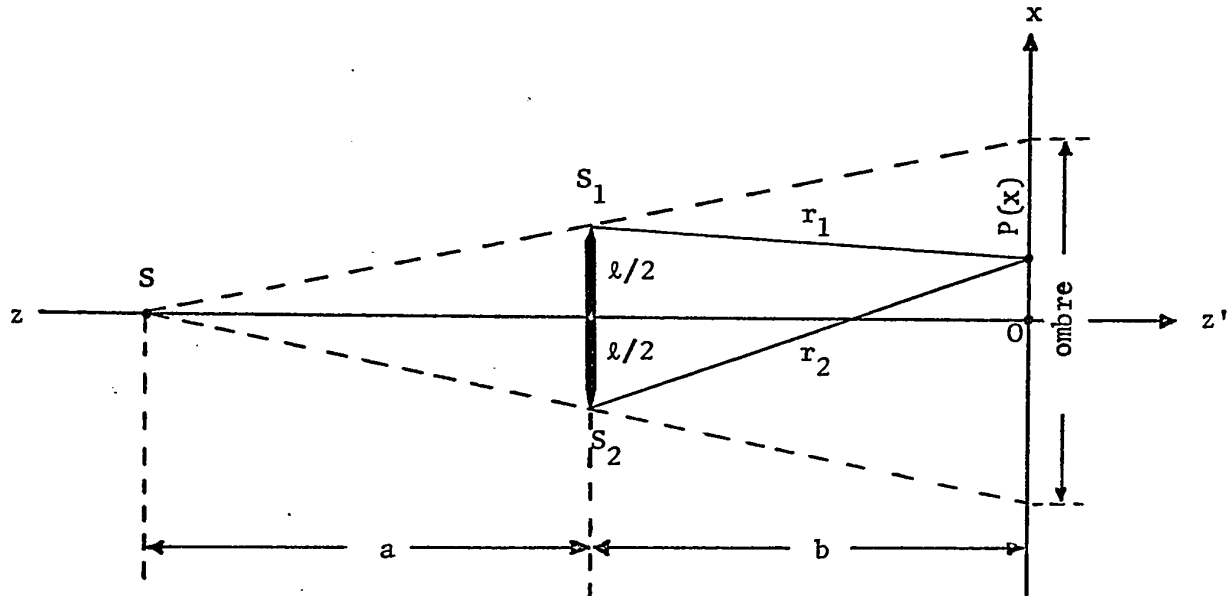


Figure 2.2, Diffraction par un masque à bords rectilignes et parallèles.

La normale au plan du masque passant par la source S détermine l'axe optique du montage. Considérons un plan d'observation perpendiculaire à l'axe optique du montage et situé à une distance b du masque. La figure de diffraction formée sur le plan d'observation montre, dans l'ombre géométrique du masque, des franges rectilignes parallèles dont on se propose de déterminer la position. Le montage possède un plan de symétrie perpendiculaire aux bords rectilignes du masque et qui contient l'axe optique du système. L'intersection de ce plan de symétrie et du plan d'observation est un axe sur lequel on considère un point P dont l'abscisse x est comptée à partir de

l'axe optique. Soient les distances r_1 et r_2 entre le point P. et les bords S_1 et S_2 du masque. Les deux bords émettent tous deux des ondes de diffraction retardées de 180° par rapport aux ondes incidentes. Par raison de symétrie, les ondes émises par les deux bords sont en phase. La condition pour obtenir un maximum est donnée par l'équation suivante.

$$r_2 - r_1 = n\lambda \quad \text{où } n \text{ est un entier} \quad (2.5)$$

$$(n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots)$$

On a aussi les relations trigonométriques,

$$r_1^2 = \left(x - \frac{l}{2}\right)^2 + b^2 \quad (2.6)$$

$$r_2^2 = \left(x + \frac{l}{2}\right)^2 + b^2 \quad (2.7)$$

En résolvant ce système d'équations on arrive au résultat

$$x = \frac{\eta\lambda}{2} \left[1 + \frac{4b^2}{l^2 - \eta^2\lambda^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Si $b \gg l \gg \eta\lambda$ on peut utiliser l'approximation

$$x \approx \frac{\eta\lambda b}{l} \quad (2.9)$$

Il est à remarquer que les résultats obtenus sont identiques à ceux que donnent les deux fentes de Young et ceci se comprend car, lorsqu'on ne considère que les franges dans l'ombre du masque, alors les deux bords se comportent comme deux fentes.

b) Diffraction par un bord tranchant

Considérons maintenant le cas de la diffraction d'une onde sphérique monochromatique incidente sur un demi-plan (Fig. 2.3)

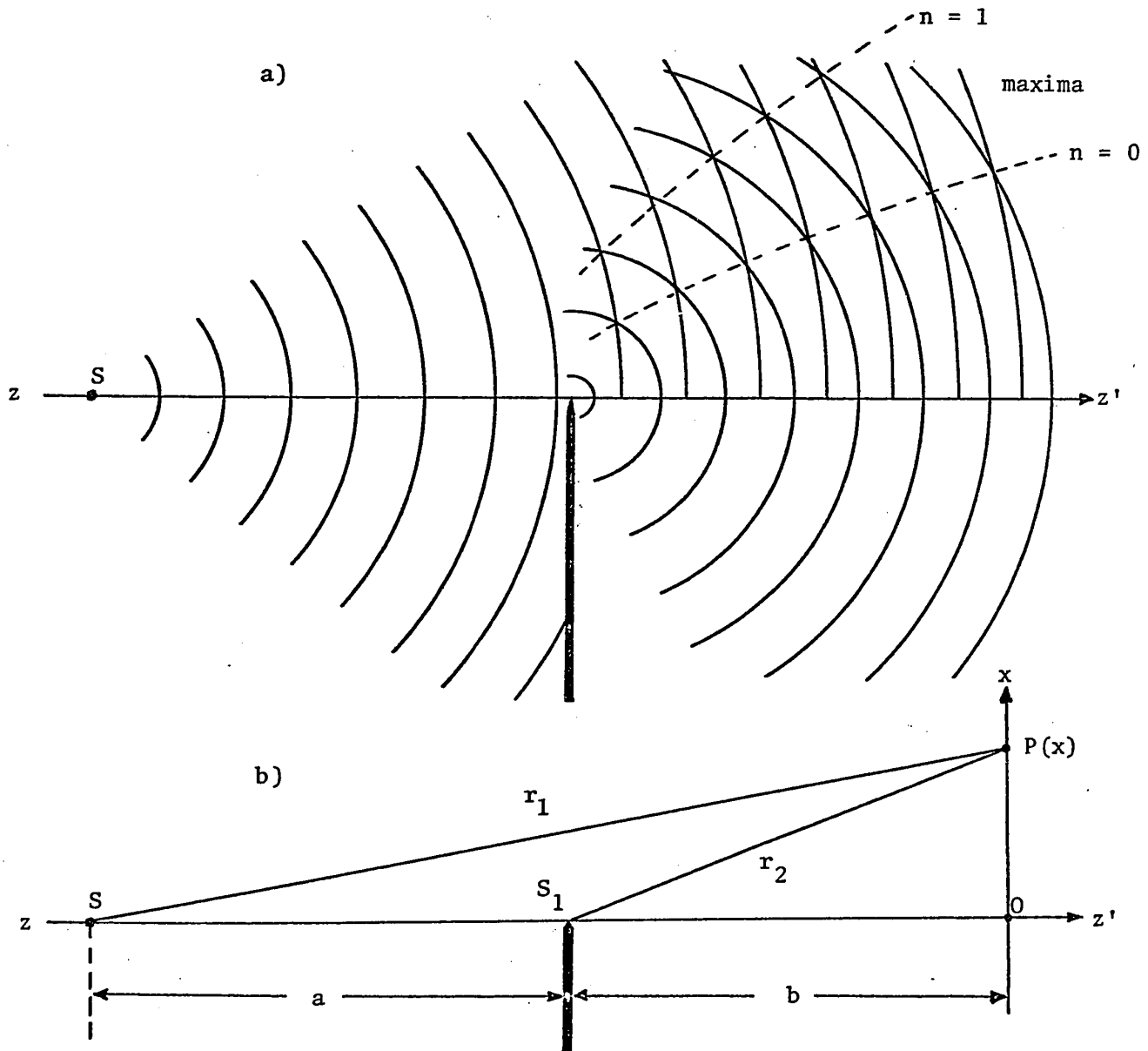


Figure 2.3 Diffraction par un bord

- a) Diagramme montrant l'émission des ondes de diffraction,
 b) Diagramme illustrant les différents paramètres du montage.

Se reportant à la figure 2.3b, nous voyons que la condition pour obtenir un maximum d'intensité dans la figure de diffraction, est donnée par:

$$(\eta + \frac{1}{2})\lambda = a + r_2 - r_1 \quad (2.10)$$

c'est à dire que la différence de chemin optique entre SS_1P et SP doit être un multiple et demi de la longueur d'onde car l'onde de diffraction est hors de phase de 180° par rapport à l'onde incidente. Deux relations trigonométriques complètent notre système d'équations.

$$r_2^2 = b^2 + x^2 \quad (2.11)$$

$$r_1^2 = (a+b)^2 + x^2 \quad (2.12)$$

La solution pour x est donnée par

$$x = \left[\left(\frac{a^2 + 2ab + [(\eta + \frac{1}{2})\lambda - a]^2}{(\eta + \frac{1}{2})\lambda - a} \right)^2 - (a + b)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

où $\eta = 0, 1, 2, \dots$

c) Calcul d'erreur

Il est important de pouvoir évaluer l'erreur maximum sur les positions des franges calculées d'après les théories de Young ou de Fresnel. Cette erreur est due aux incertitudes expérimentales sur a , b et λ . Puisque les deux théories conduisent à des valeurs

d'interfranges très voisines, on peut s'attendre à ce que les deux théories soient influencées d'une manière à peu près identique par les incertitudes expérimentales. Pour cette raison, on a choisi la théorie de Young pour effectuer le calcul d'erreur, celle-ci s'y prêtant plus facilement. Ce que nous appelons ici erreur sur la position d'une frange est la déviation maximum entre la mesure expérimentale de la position de cette frange et les deux valeurs calculées d'après l'une ou l'autre des deux théories. La mesure expérimentale considérée ici est une valeur moyenne à laquelle est associée une autre marge d'erreur qui dépend de la méthode d'analyse des données expérimentales.

CHAPITRE 3.

ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. Choix de conditions expérimentales

Les deux théories de la diffraction que nous venons d'exposer ne s'accordent pas toujours. Leur écart est souvent négligeable, mais il peut devenir important sous certaines conditions expérimentales. Ce sont ces conditions qui nous intéressent et plus précisément, celles où l'écart entre les deux théories est plus grand que l'erreur expérimentale.

Nous avons d'abord considéré les franges d'interférence situées dans l'ombre d'un masque opaque lorsque celui-ci est éclairé par une source de lumière cohérente. Le masque que nous avons à notre disposition, a été taillé et poli par M. Harold Konowalchuck; il mesure 22 millimètres de large sur 120 de long. Les deux bords qui sont aussi tranchants qu'une lame de rasoir, sont rectilignes et parallèles à la précision du micron.

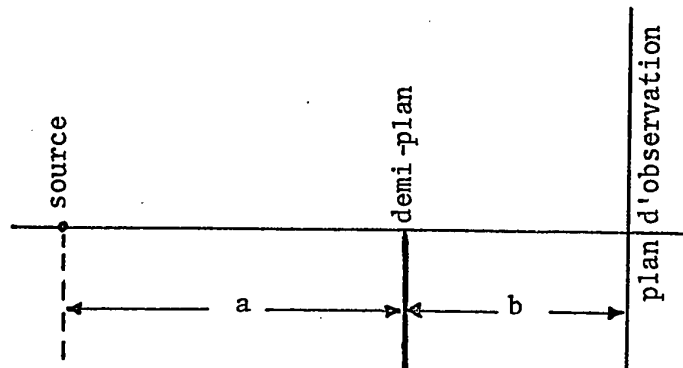
Nous avons considéré ensuite la diffraction par un seul bord tranchant avec la formation de franges dans la région extérieure à l'ombre géométrique et nous avons trouvé que les conditions expérimentales convenaient mieux que les précédentes pour trancher la question. Le désaccord entre les calculs basés sur l'une et l'autre des deux théories, est relativement grand surtout sur les positions des premières franges

voisines de la limite géométrique séparant la région d'ombre et la région de lumière dans la figure de diffraction (Tableau I). Au début de cette recherche nous n'avions aucun procédé pour localiser sur la plaque photographique, la position de cette limite géométrique; nous devons donc nous limiter au désaccord sur les interfranges lequel est suffisamment grand pour que l'expérience soit valable. Ultérieurement, nous avons trouvé un procédé expérimental pour localiser la limite géométrique, d'où la possibilité de déterminer la position des franges par rapport à cette limite prise pour origine des abscisses. Le procédé expérimental utilisé à cette fin sera décrit dans la section 3.5 du présent chapitre. Dans les deux cas, un problème devait être résolu: trouver à un micron près la position du centre d'une frange de 300 à 500 microns de large. Les solutions à ce problème seront décrites dans la section 3.4 intitulée: "analyse de l'enregistrement graphique".

TABLEAU I
CALCULS THEORIQUES

Positions des franges relativement à la limite géométrique ombre-lumière et valeurs des interfranges dans la figure de diffraction d'un demi-plan pour différentes valeurs de la distance b entre le demi-plan diffringent et le plan d'observation

$$\begin{aligned} a &= 1000.000 \text{ mm} \\ \Delta a &= 0.0105 \text{ mm} \\ \Delta b &= 0.004 \text{ mm} \\ \lambda &= 6328.222 \text{ \AA} \\ \Delta \lambda &= 0.001 \text{ \AA} \end{aligned}$$



(Toutes les valeurs ci-dessous sont en mm)

i	THEORIE DE YOUNG		THEORIE DE FRESNEL		ECART SUR LES INTERFRANGES $\Delta y_i - \Delta x_i$	ERREUR ABSOLUE SUR LES FRANGES
	Abscisses x_i	Interfranges $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$	Abscisses y_i	Interfranges $\Delta y_i = y_i - y_{i-1}$		
b = 200 mm						
1	0.390		0.335			
2	0.675	0.285	0.646	0.311	0.025	0.006
3	0.871	0.196	0.849	0.203	0.007	0.005
4	1.031	0.160	1.012	0.163	0.004	0.004
5	1.169	0.138	1.153	0.140	0.002	0.003
6	1.293	0.123	1.278	0.125	0.001	0.003

TABLEAU I (suite 1)

i	x_i	Δx_i	y_i	Δy_i	$\Delta y_i - \Delta x_i$	
b = 400 m						
1	0.595		0.512			
2	1.031	0.436	0.987	0.475	0.039	0.004
3	1.331	0.300	1.297	0.310	0.010	0.003
4	1.575	0.244	1.546	0.249	0.005	0.003
5	1.786	0.211	1.761	0.214	0.003	0.002
6	1.974	0.188	1.952	0.191	0.002	0.002
b = 600 mm						
1	0.779		0.671			
2	1.350	0.570	1.292	0.671	0.051	0.003
3	1.743	0.393	1.699	0.621	0.014	0.002
4	2.062	0.319	2.025	0.406	0.007	0.002
5	2.338	0.276	2.305	0.326	0.004	0.002
6	2.585	0.247	2.555	0.280	0.003	0.001
b = 800 mm						
1	0.954		0.822			
2	1.653	0.699	1.583	0.761	0.062	0.002
3	2.135	0.481	2.080	0.498	0.017	0.002
4	2.526	0.391	2.480	0.400	0.009	0.002
5	2.864	0.338	2.824	0.344	0.005	0.001
6	3.166	0.302	3.130	0.306	0.004	0.001

TABLEAU I (suite 2)

i	x_i	Δx_i	y_i	Δy_i	$\Delta y_i - \Delta x_i$	
$b = 1000 \text{ mm}$						
1	1.125		0.968			
2	1.949	0.824	1.865	0.897	0.073	0.002
3	2.516	0.567	2.452	0.587	0.020	0.002
4	2.976	0.461	2.923	0.471	0.010	0.001
5	3.375	0.399	3.328	0.405	0.006	0.001
6	3.731	0.356	3.688	0.361	0.005	0.001

3.2 Formation de la figure de diffraction et de son enregistrement photographique.

Le montage de la figure 3.1 a été réalisé sur un banc d'optique Beck de haute précision (voir fig. 3.10)

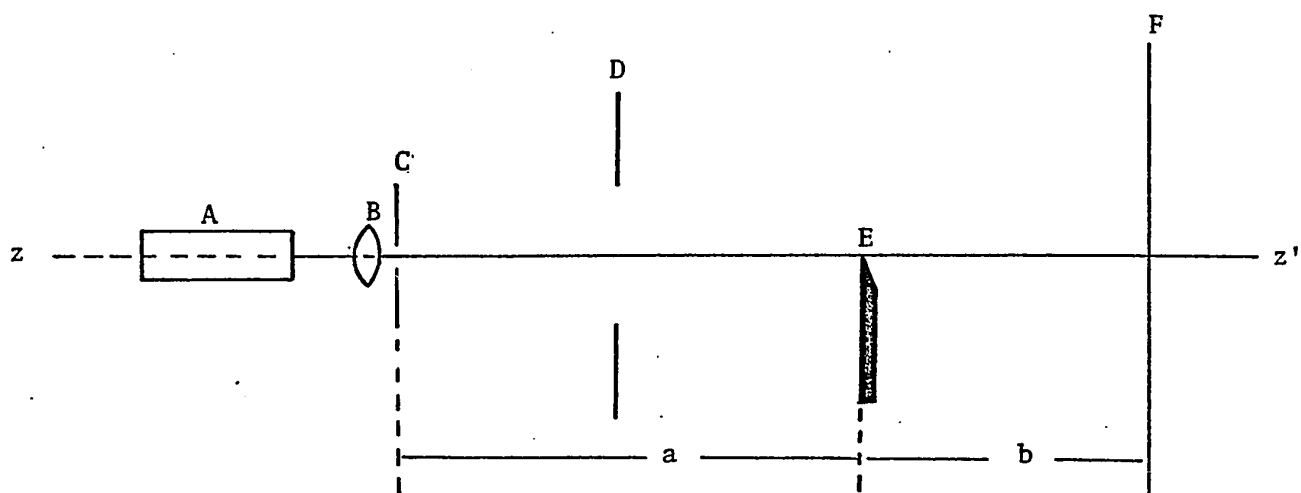


Figure 3.1 Schéma du montage sur le banc d'optique

A: Laser He-Ne (Spectra Physics Stabilite, Model 120);

B: Objectif de microscope 3 x;

C: Sténopé de 10 microns de diamètre;

D: Diaphragme;

E: Bord diffringent;

F: Plaque photographique;

zz': Axe optique du système.

Toutes les composantes sauf le laser He-Ne, sont montées sur le banc d'optique d'une longueur de 2.5 mètres. L'objectif de microscope 3 x focalise le faisceau laser sur un sténopé de 10 microns de diamètre. Un diaphragme est utilisé pour supprimer les anneaux secondaires de la tache d'Airy produite par le sténopé; ceci dans le but d'éliminer le plus possible la lumière qui pourrait parvenir à la plaque photographique par réflexion sur le banc d'optique ou sur les objets adjacents. Le bord diffringent est monté sur un support possédant quatre degrés de liberté. Deux mouvements de rotation relativement à deux axes orthogonaux entre eux, permettent d'amener le demi-plan diffringent à être normal à l'axe optique du montage. Deux mouvements de translation, orthogonaux entre eux, sont utilisés pour positionner le demi-plan de telle façon que son bord soit exactement sur l'axe optique du montage. La plaque photographique est montée sur un support très stable et orientée aussi pour que son plan soit orthogonal à l'axe optique du montage.

Les distances a et b sont mesurées à l'aide d'une unité optique composée de deux microscopes rigidement liés l'un à l'autre et montés sur une base coulissant sur le banc d'optique (voir fig. 3.11). L'un d'eux, d'un grossissement 300 x, est monté horizontalement et sert aux pointés de position sur le sténopé, le masque ou la plaque photographique, tandis que l'autre, monté verticalement et d'un grossissement 100 x, sert aux pointés d'abscisses longitudinales sur une règle de haute précision, longue de 50 centimètres,

montée sur le coté du banc d'optique. Cette règle calibrée au dixième de micron, peut être déplacée tout le long du banc.

La distance a a été fixée à environ un mètre tandis que la distance b a été ajustée successivement à 0.4, 0.45 et 0.5 mètre. La distance de 0.4 mètre est le minimum imposé par la dimension de l'unité optique de pointée et du support du bord tranchant. Pour les distances b supérieures à 0.5 mètre, les franges sont très larges et soulèvent certains problèmes concernant notamment l'orientation de la plaque photographique sur la platine mobile de l'interféromètre (voir section 3.3).

La profondeur de champ du microscope horizontal ainsi que la résolution transversale du microscope vertical sont de l'ordre du micron. Nous avons donc admis que l'erreur sur chaque pointé fait avec l'un ou l'autre des microscopes est de un micron. La détermination de b nécessite quatre pointés, un premier sur le masque, deux sur la règle calibrée et un dernier sur la plaque photographique; nous admettons donc une erreur absolue de 4 microns sur cette grandeur. La détermination de a est plus complexe parce qu'elle comporte une opération de retournement du microscope horizontal. Premièrement, un pointé sur le sténopé est effectué, ensuite quatre pointés sur la règle nous amènent à une distance de 1 mètre du sténopé; c'est alors que la manoeuvre de retournement débute. Elle consiste premièrement à pointer sur le dioptre antérieur d'une lame à faces parallèles montée sur le banc d'optique dans un plan orthogonal à

l'axe optique du montage. La distance entre cette face de la lame et le sténopé est donc de 1 mètre. L'unité optique est alors transportée de l'autre côté de la lame à faces parallèles et la direction de visée du microscope horizontal est inversée de telle sorte que ce dernier puisse venir pointer sur l'autre face de la lame. L'épaisseur de la lame a été mesurée au préalable et l'erreur absolue sur cette grandeur due à l'instrument de mesure, est de 2.5 microns (0.1 mil). Un dernier pointé sur le masque complète la détermination de a , huit pointés ont été nécessaires et une erreur de 2.5 microns est associée à l'incertitude sur l'épaisseur de la lame à faces parallèles; l'erreur absolue sur a est donc de 10.5 microns.

La longueur d'onde du faisceau laser dépend de l'indice de réfraction de l'air. Celle du laser He-Ne dans l'air, à 20°C, 760 mm de Hg, 59% d'humidité relative et 0.03% de CO₂ est de 6328.1984⁰Å⁴. Connaissant la variation de l'indice de réfraction de l'air en fonction de la température⁵, nous avons évalué la longueur d'onde du laser He-Ne, à 24.0 ± 1.0°C, à 6328.222 ± 0.0015⁰Å. L'erreur sur la longueur d'onde a été incluse dans le calcul d'erreur global sur les franges, toutefois elle est absolument négligeable en regard de l'erreur sur b .

3.3. Analyse des plaques photographiques au moyen de l'interféromètre de Michelson.

Lorsqu'on a obtenu une photographie de la figure de diffraction, il faut mesurer la position des franges avec la plus grande précision possible. Le faire directement sur la plaque avec un microcomparateur ne donne pas la précision requise; c'est pourquoi Dr. Lansraux et ses assistants ont construit un interféromètre de Michelson (voir figure 3.8) dont un des miroirs est monté sur la platine d'un microphotomètre. Le déplacement rectiligne de cette platine est axé sur l'un des faisceaux optiques de l'interféromètre. La plaque photographique posée sur la platine est analysée par la photomultiplicatrice du microphotomètre laquelle envoie à un enregistreur sur bande de papier graphique un signal proportionnel à la densité optique de la plaque. La platine, mue par un petit moteur à vitesse variable, produit par son déplacement, un défilement de franges d'interférence dans l'interféromètre de Michelson. Ces franges sont analysées par un détecteur composé d'un phototransistor et d'un système électronique produisant une brève impulsion électronique à chaque passage d'une frange, c'est-à-dire pour des déplacements de la platine de $\lambda/2$ (~ 0.3 micron). L'impulsion électronique est superposée au signal émis par la photomultiplicatrice du microphotomètre

pour donner la courbe enregistrée dont on peut examiner un échantillon ci-joint (figure 3.12). La précision des pointés sur cette courbe est meilleure que le tiers de micron.

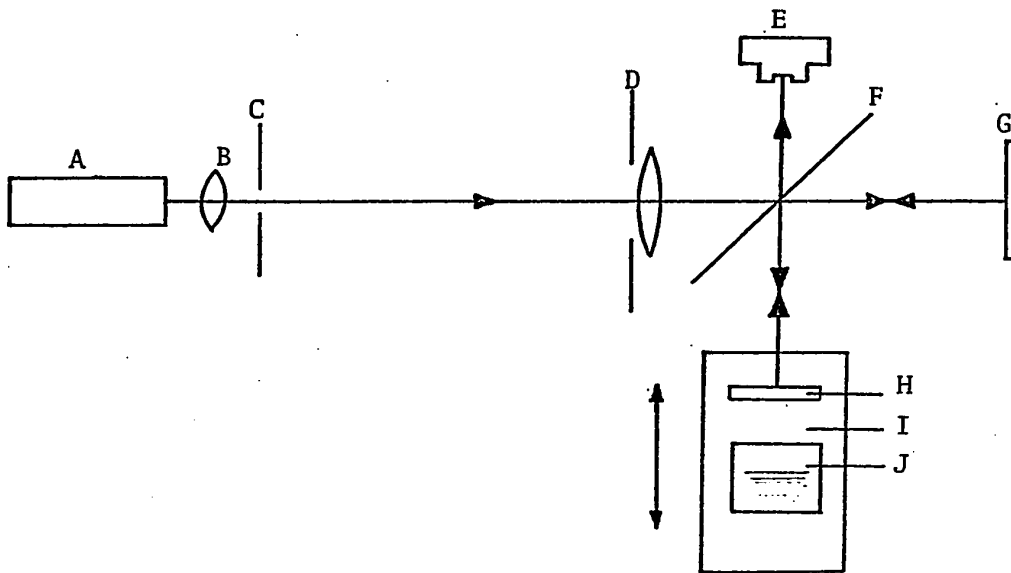


Figure 3.2 Interféromètre de Michelson

- | | |
|---|--------------------------|
| A: Laser He-Ne | F: Séparatrice |
| B: Condenseur | G: Miroir orientable |
| C: Sténopé | H: Miroir orientable |
| D: Lentille collimatrice
et diaphragme | I: Platine mobile |
| E: Détecteur (phototransistor) | J: Plaque photographique |

Les réglages de l'interféromètre de Michelson sont classiques et relativement faciles. Il en est autrement en ce qui concerne le mouvement de la platine mobile; celle-ci doit se déplacer exactement dans la direction du faisceau collimaté incident sinon la distance D balayée sur la plaque photographique sera supérieure à celle d enregistrée par l'interféromètre (voir figure 3.3).

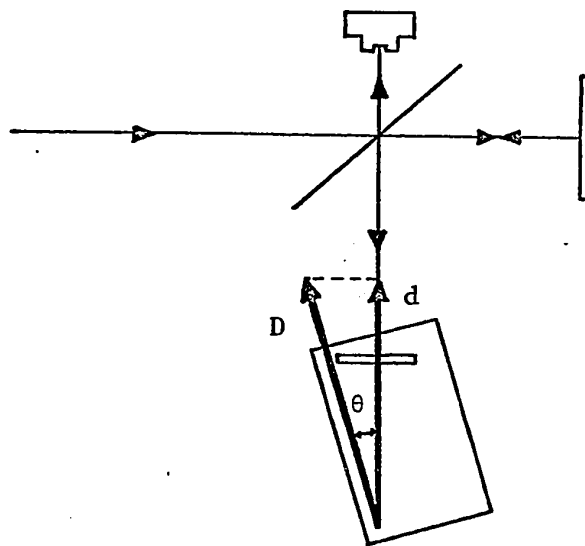


Figure 3.3 Schéma d'un défaut d'orientation de la platine mobile de l'interféromètre.

Considérons l'angle θ entre la direction du faisceau collimaté incident et l'axe de translation de la platine mobile; quel est sa valeur maximum tolérable ?

On a:

$$\cos \theta = \frac{d}{D}$$

soit δ l'erreur relative maximum qu'on peut tolérer sur D,

$$d = D - \delta D$$

$$\cos \theta = \frac{D - \delta D}{D} = 1 - \delta$$

D'autre part, pour θ petit:

$$\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$$

donc,

$$1 - \delta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$$

$$\theta \approx \sqrt{2\delta}$$

Pour une précision de 0.01% sur D, θ doit être réduit à moins de 8/10 de degré. Afin de réaliser cette condition, nous avons placé un petit fil métallique en position verticale devant le miroir de la platine. Un microscope monté à la place du détecteur permet d'observer la figure de diffraction produite par le fil, le deuxième miroir de l'interféromètre ayant été recouvert temporairement d'un drap noir afin d'éliminer les franges d'interférence. Lorsque le mouvement de la platine est parfaitement axé sur la direction du faisceau collimaté incident, la frange brillante centrale de la figure de diffraction du fil ne bouge pas lorsque la platine avance ou recule; au contraire si la frange bouge, en mesurant le déplacement transversal de cette frange et le déplacement longitudinal de la platine on peut déterminer θ .

On a deux possibilités; soit orienter la platine avec la précision désirée ou bien utiliser un facteur de correction connaissant l'angle θ . Nous avons opté pour la première alternative et avons réalisé une orientation telle que l'erreur sur D est plus petite que 0.0002%.

Une autre orientation importante est celle de la plaque photographique sur la platine. Elle doit être telle que les franges enregistrées sur la plaque soient perpendiculaires au mouvement de la platine. Pour réaliser cette orientation, on enlève temporairement la photomultiplicatrice, on monte un oculaire avec réticule et on observe les franges enregistrées sur la plaque photographique. Une frange est alors amenée en coïncidence avec les fils croisés du réticule. Par construction, la platine peut être déplacée suivant un mouvement rectiligne exactement perpendiculaire au déplacement longitudinal précédemment étudié et qui a été axé sur le faisceau collimaté incident de l'interféromètre. En utilisant le déplacement transversal de la platine, la frange observée à travers le microscope glisse sur elle-même en restant en coïncidence avec le réticule lorsque la condition d'orientation de la plaque photographique est réalisée. Sinon, lorsqu'on détecte un déplacement de la frange par rapport au réticule, il convient de corriger ce défaut d'orientation de la plaque. La plus grande difficulté dans ce réglage provient du fait que, sous le microscope, le contraste des franges est très faible et que ces franges étant très larges, une seule remplit presque complètement le champ du microscope, d'où une difficulté à localiser son centre.

3.4 Analyse de l'enregistrement graphique

L'unité précédemment décrite, constituée par le microphotomètre et l'interféromètre, permet de balayer quelques millimètres sur une photographie de figure de diffraction et d'enregistrer la courbe de densité optique sur une bande de papier graphique de l'ordre de 36 mètres de longueur.

L'échelle des abscisses sur le papier graphique est précise au tiers de micron. Un système électronique complémentaire facilite le décompte des impulsions en inversant périodiquement le sens de la seizième impulsion.

Sur l'enregistrement, les franges sont considérablement étirées; les plus larges peuvent atteindre une longueur de 6 mètres. Il faut alors localiser la position de leur centre avec une précision de l'ordre du centimètre pour obtenir la précision requise. Deux méthodes ont été utilisées: la méthode des moindres carrés et une méthode graphique dite de convergence. La deuxième méthode a été essentiellement utilisée pour vérifier la validité de la première.

La méthode des moindres carrés est classique; on peut en trouver une description dans le livre de Lanczos⁶.

Elle consiste à rechercher l'équation de la courbe qui donne l'écart quadratique minimum avec les données expérimentales. Afin que les calculs effectués sur l'ordinatrice se fassent rapidement, nous imposons la condition que l'expression recherchée soit un polynome de l'abscisse x .

Sa forme générale est:

$$y = a_0 P_0 + a_1 P_1(x) + \dots + a_n P_n(x) \quad (3.1)$$

où les fonctions $P_i(x)$, ($0 \leq i \leq n$), sont des polynomes d'ordre i .

$$P_i(x) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_i x^i \quad (3.2)$$

L'équation (3.1) représente une courbe de lissage d'ordre n puisque n est la puissance de x la plus élevée dans y . Les coefficients a_i sont des paramètres qui sont déterminés, en fonction des données expérimentales.

Le choix des polynomes $P_i(x)$ est très important puisqu'il détermine la précision de la courbe de lissage. Les polynomes de Chebyshev ont été choisis car ils tendent à donner une distribution uniforme de l'écart quadratique sur tout le domaine de l'intervalle couvert par les point expérimentaux.

Les coefficients a_i s'obtiennent en résolvant ce système de Cramer sous la condition $N \geq n$. Le calcul des $T_i(x_j)$ est grandement facilité par la formule de récurrence qui lie les polynomes de Chebyshev entre eux.

$$T_{k+1}(x) = 2x T_k(x) - T_{k-1}(x) \quad (3.7)$$

La méthode des moindres carrés a été utilisée pour obtenir les courbes de lissage de chacune des franges. On a utilisé un nombre N de points expérimentaux pour la détermination des coefficients a_i , variant entre 40 et 100 selon la dimension de la frange. Pour chacune des franges, les courbes de lissage d'ordre 3 à 15 ont été obtenues et pour chacune de ces courbes la position du maximum correspondant au centre de la frange, fut déterminée. Après examen des écarts moyens entre les positions du centre de la frange calculées pour les différentes courbes de lissage d'une même frange, on a convenu d'utiliser comme position du centre, la moyenne des valeurs obtenues à l'aide des courbes de lissage d'ordre 6 à 15.

La deuxième méthode, dite méthode de convergence, est illustrée par la figure 3.4. On trace d'abord la courbe médiane lieu des points i équidistants des points I_1 et I_2

d'égale densité optique et situés sur la courbe expérimentale de part et d'autre du maximum. On extrapole cette courbe médiane pour déterminer le point M d'intersection avec la courbe de densité optique. Ce point définit le centre de la frange. Les franges étant asymétriques,

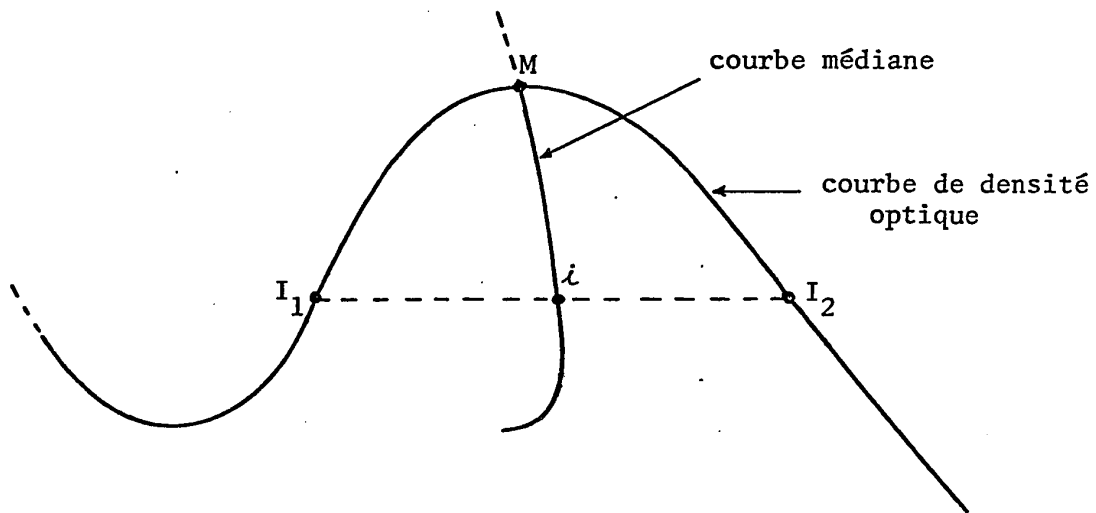


Figure 3.4. Méthode graphique, dite de convergence, pour localiser le centre d'une frange.

la courbe médiane n'est pas une ligne droite et ce défaut de linéarité est d'autant plus grand que l'asymétrie est plus importante.

La figure 3.5 montre la courbe médiane théorique (théorie de Fresnel) pour la frange d'ordre 1 de la figure de diffraction d'un demi-plan

($a \hat{=} 1.0$ mètre, $b = 0.4$ mètre). Un exemple de détermination expérimentale de la courbe médiane est donné dans la figure 3.6; il s'agit de la frange d'ordre 1 située près de l'ombre géométrique ($a = 1.0$ mètre, $b = 0.45$ mètre).

Figure 3.5 LOCALISATION DU CENTRE D'UNE FRANGE

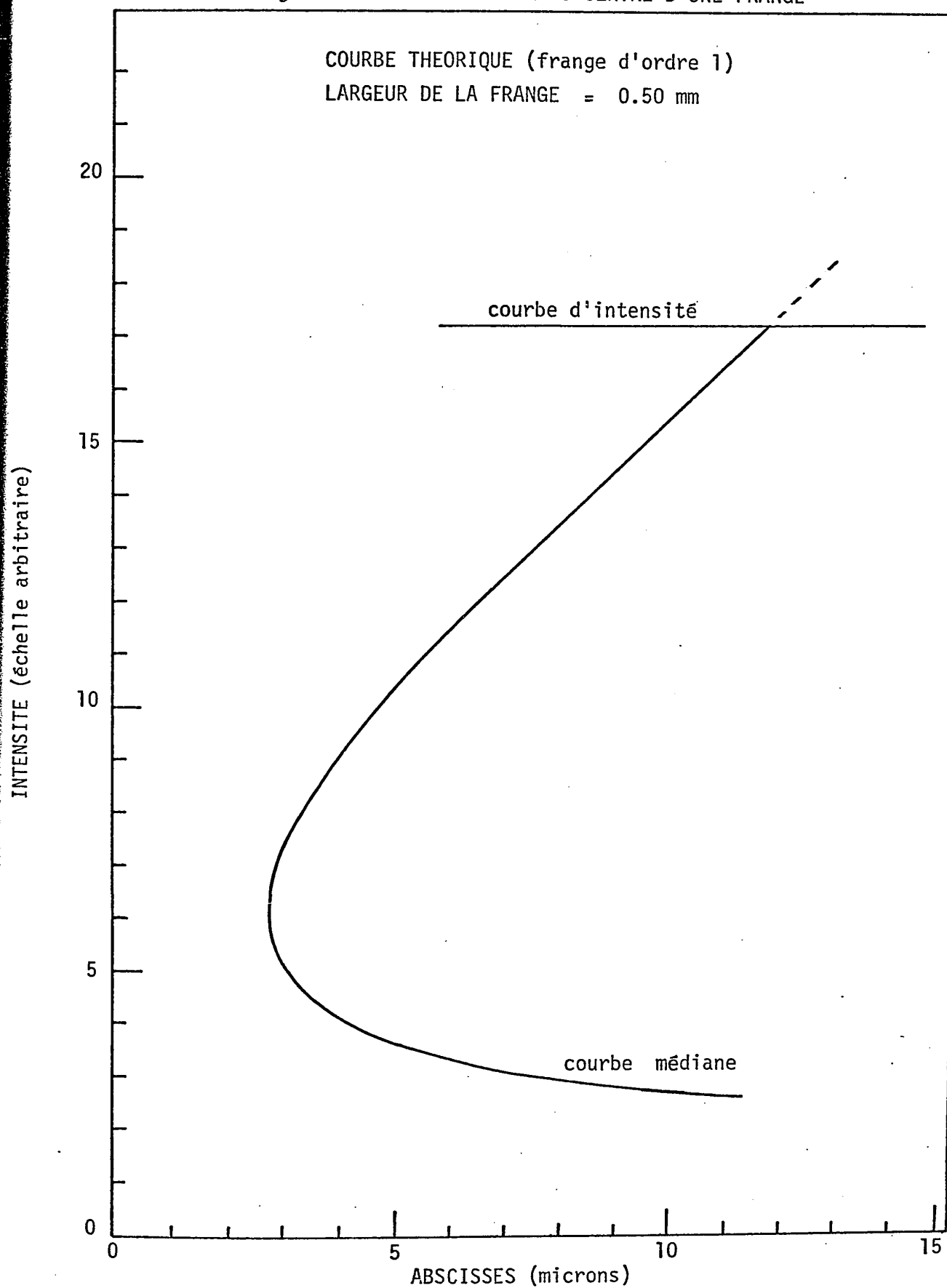
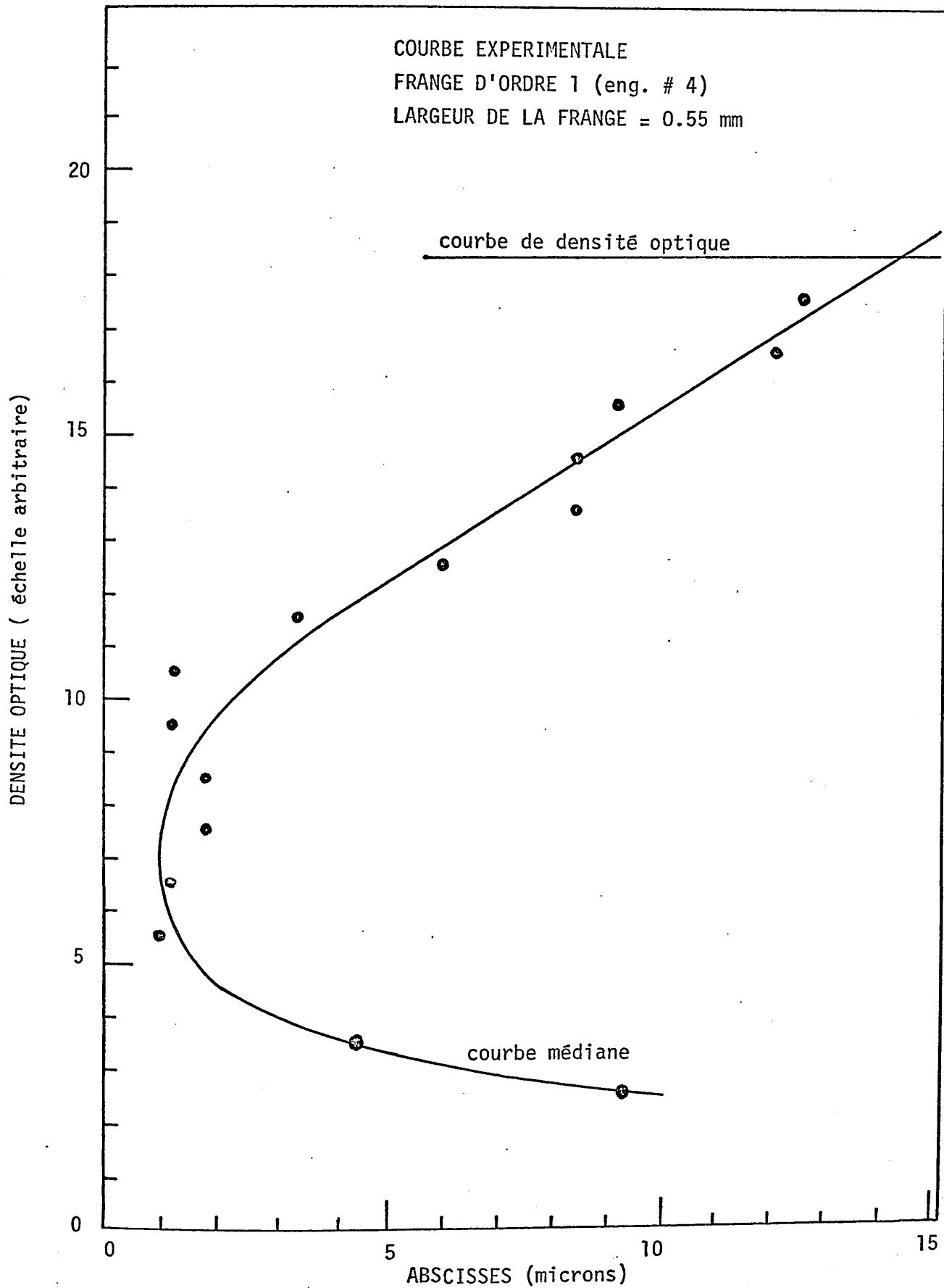


Figure 3.6 LOCALISATION DU CENTRE D'UNE FRANGE



3.5 Dernière amélioration et résultats définifs.

Deux plaques photographiques ont été analysées à l'aide des techniques décrites précédemment. Les valeurs expérimentales de certains interfranges s'accordent assez bien avec les calculs selon la théorie de Fresnel, mais pour d'autres interfranges, notamment ceux relatifs aux franges situées au voisinage de la limite géométrique onde-lumière, les valeurs expérimentales sont intermédiaires entre les valeurs numériques calculées avec l'une et l'autre des deux théories considérées. Il est alors évident qu'il ne suffit pas de mesurer les interfranges et qu'il faut trouver un moyen pour déterminer les positions des franges par rapport à la limite géométrique. Sur la plaque photographique, rien ne permet à priori de localiser cette limite géométrique.

Nous avons trouvé une solution à ce problème. La photographie de la figure de diffraction est réalisée avec un masque possédant deux bords tranchants rectilignes et parallèles au micron près. Un seul des bords est utilisé, l'autre étant recouvert d'un drap noir. Après avoir photographié la figure de diffraction formée par un des bords du masque, si nous pouvons amener le second bord exactement au même endroit qu'avait occupé le premier, nous obtiendrons

une deuxième figure de diffraction exactement identique à la première et située de l'autre côté de la limite géométrique onde-lumière. Le centre de symétrie de la figure ainsi obtenue nous donnera la position de cette limite géométrique.

Le masque peut être déplacé transversalement à l'axe du banc d'optique grâce à un dispositif de translation de son support. En plaçant un microscope de grossissement moyen (300 x) sur le banc d'optique et en pointant le bord diffringent on repère d'abord la position du bord du masque, ensuite on déplace le masque jusqu'à ce que le second bord prenne la place qu'avait occupé le premier. L'incertitude sur la position du second bord est au maximum de deux microns. La plaque photographique est recouverte d'un écran protecteur de la lumière durant cette opération de transfert du masque mais sans être déplacée; puis elle est exposée une seconde fois. La figure 3.7 nous montre la figure de diffraction obtenue à l'aide de cette double exposition.

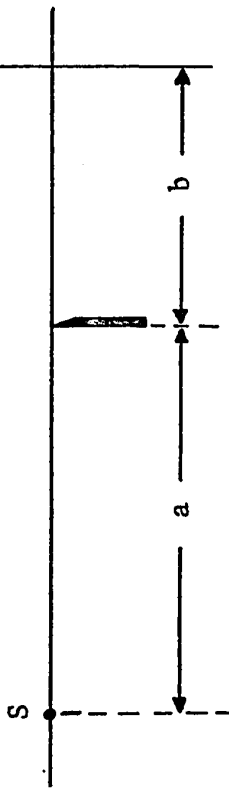
Les résultats expérimentaux sont présentés dans les tableaux II et III. Dans le premier, la distance pupille-plaque photographique est de 0.4 mètre tandis que dans le second, elle a été portée à 0.45 mètre. La distance source-pupille a été maintenue à 1 mètre.

Dans le tableau IV nous présentons un exemple de l'application des méthodes décrites dans la section 3.4 pour la localisation du centre des franges. La figure de diffraction utilisée est celle dont les valeurs expérimentales sont données dans le tableau II.

TABLEAU II

DIFFRACTION PAR UN DEMI-PLAN

CALCULS THEORIQUES ET RESULTATS EXPERIMENTAUX (ENR. #5)



$a = 995.4237 \text{ mm}$ $\Delta a = 0.0105 \text{ mm}$
 $b = 400.0174 \text{ mm}$ $\Delta b = 0.005 \text{ mm}$
 $\lambda = 6328.222 \text{ \AA}$ $\Delta \lambda = 0.0015 \text{ \AA}$

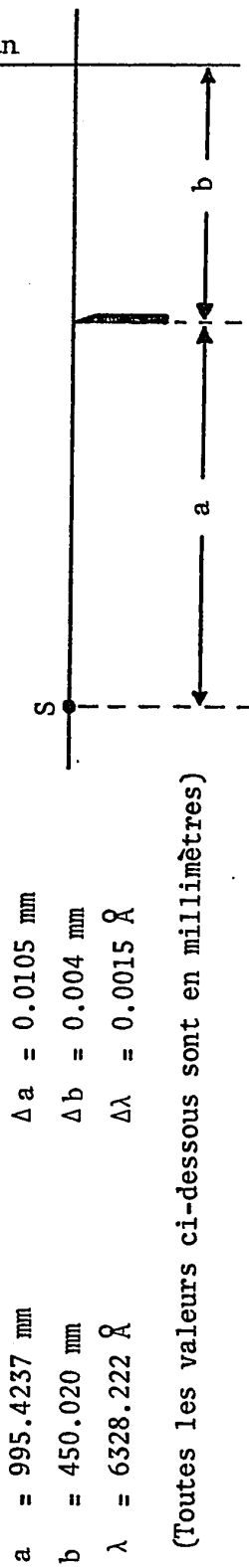
(Toutes les mesures ci-dessous sont en millimètres)

ORDRE DES FRANGES N	THEORIE DE YOUNG		THEORIE DE FRESNEL		RESULTATS EXPERIMENTAUX		ERREUR ABSOLUE SUR LES FRANGES
	ABSCISSES	INTERFRANGES	ABSCISSES	INTERFRANGES	ABSCISSES	INTERFRANGES	
1	0.596		0.513		0.515		0.008
2	1.032	0.436	0.988	0.475	0.982	0.467	0.005
3	1.332	0.300	1.298	0.311	1.295	0.314	0.004
4	1.576	0.244	1.548	0.249	1.544	0.248	0.003
5	1.787	0.211	1.762	0.214	1.762	0.218	0.003
6	1.976	0.189	1.953	0.191	1.953	0.191	0.003

TABLEAU III

DIFFRACTION PAR UN DEMI-PLAN

CALCULS THEORIQUES ET RESULTATS EXPERIMENTAUX (ENR. # 4).



ORDRE DES FRANGES N	THEORIE DE YOUNG		THEORIE DE FRESNEL		RESULTATS EXPERIMENTAUX		ERREUR ABSOLUE SUR LES FRANGES
	ABSCISSES	INTERFRANGES	ABSCISSES	INTERFRANGES	ABSCISSES	INTERFRANGES	
1	0.643		0.553		0.557		
2	1.114	0.471	1.066	0.513	1.062	0.505	0.004
3	1.438	0.324	1.401	0.335	1.397	0.335	0.003
4	1.701	0.263	1.671	0.269	1.667	0.269	0.002
5	1.929	0.228	1.902	0.232	1.898	0.232	0.002
6	2.133	0.204	2.108	0.206	2.105	0.207	0.002

TABLEAU IV
 LOCALISATION DU CENTRE DES FRANGES
 COMPARAISON DES DEUX METHODES
 (ENREGISTREMENT # 4)

$$\begin{array}{ll}
 a = 995.4237 \text{ mm} & \Delta a = 0.0105 \text{ mm} \\
 b = 450.020 \text{ mm} & \Delta b = 0.004 \text{ mm} \\
 \lambda = 6328.222 \text{ \AA} & \Delta \lambda = 0.0015 \text{ \AA}
 \end{array}$$

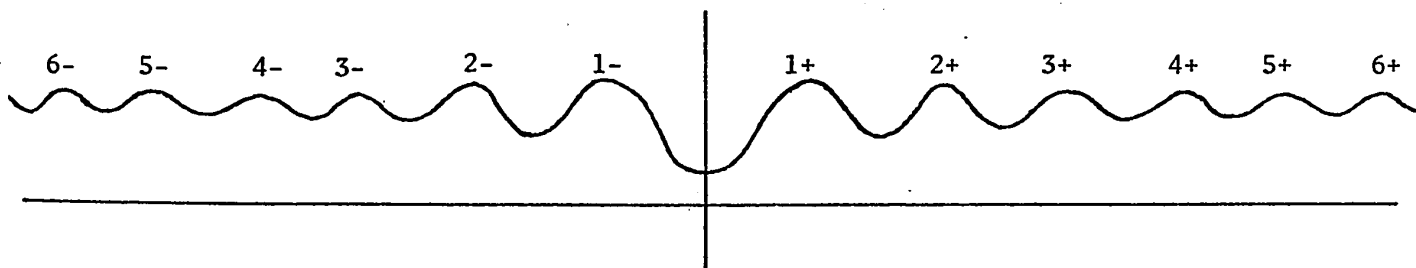


FIGURE DE DIFFRACTION

Franges

Localisation du centre
 (échelle arbitraire en mm)

	<u>Méthode des</u> <u>moindres carrés</u>	<u>Méthode de</u> <u>convergence</u>
6-	0.084	0.085
5-	0.293	0.291
4-	0.523	0.521
3-	0.790	0.790
2-	1.129	1.124
1-	1.630	1.630
1+	2.744	2.737
2+	3.254	3.253
3+	3.585	3.584
4+	3.857	3.855
5+	4.089	4.090
6+	4.294	4.293

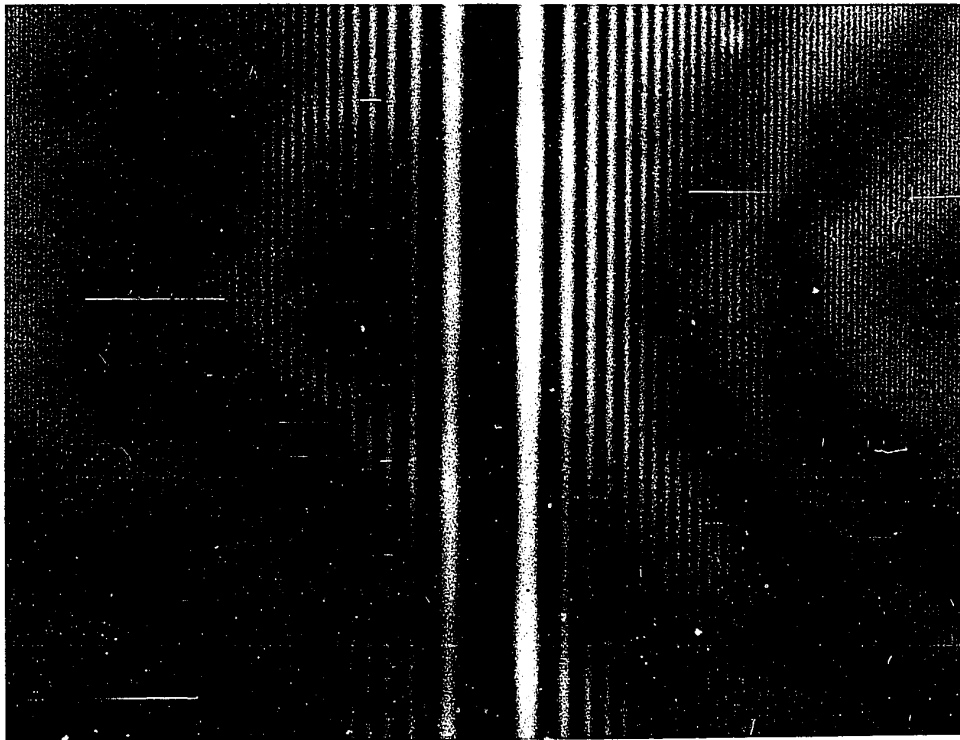
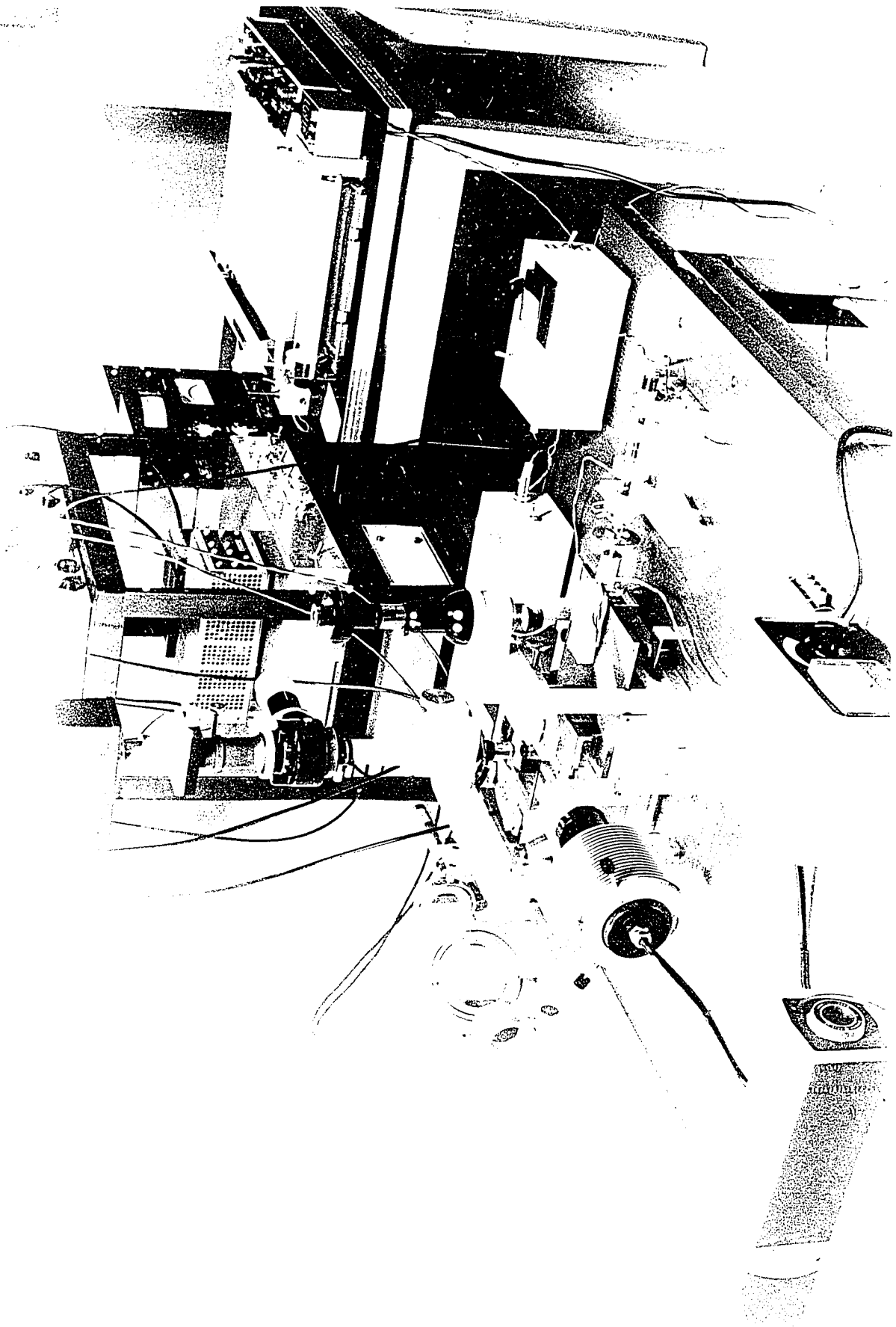


Figure 3.7 Photographie de la double figure de diffraction formée par un bord rectiligne diffringent selon la méthode décrite dans le texte, section 3.5.



Figure 3.8 Interféromètre de Michelson avec système électronique associé.



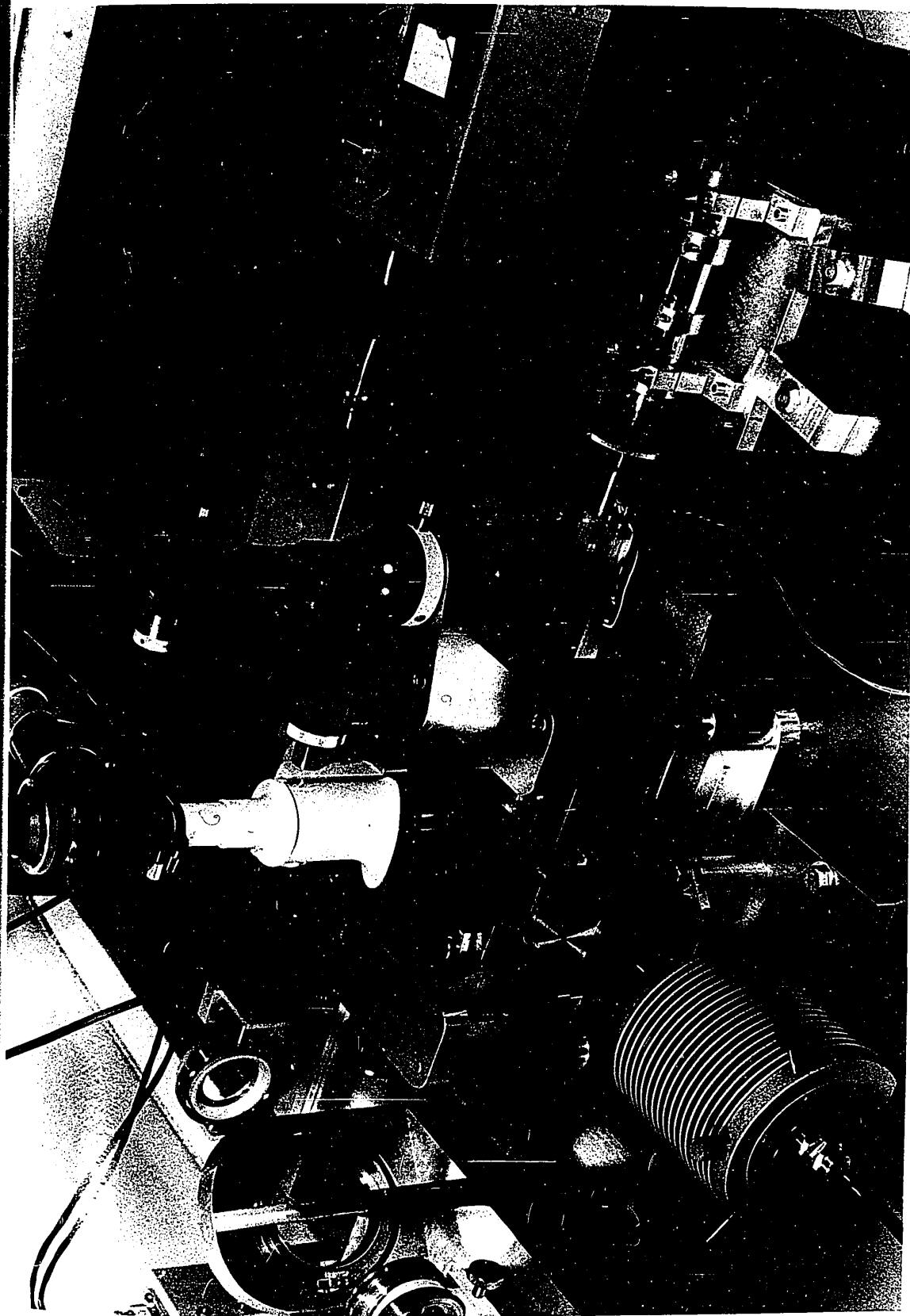


Figure 3.9 Platine mobile de l'interféromètre et unité d'analyse microphotométrique.

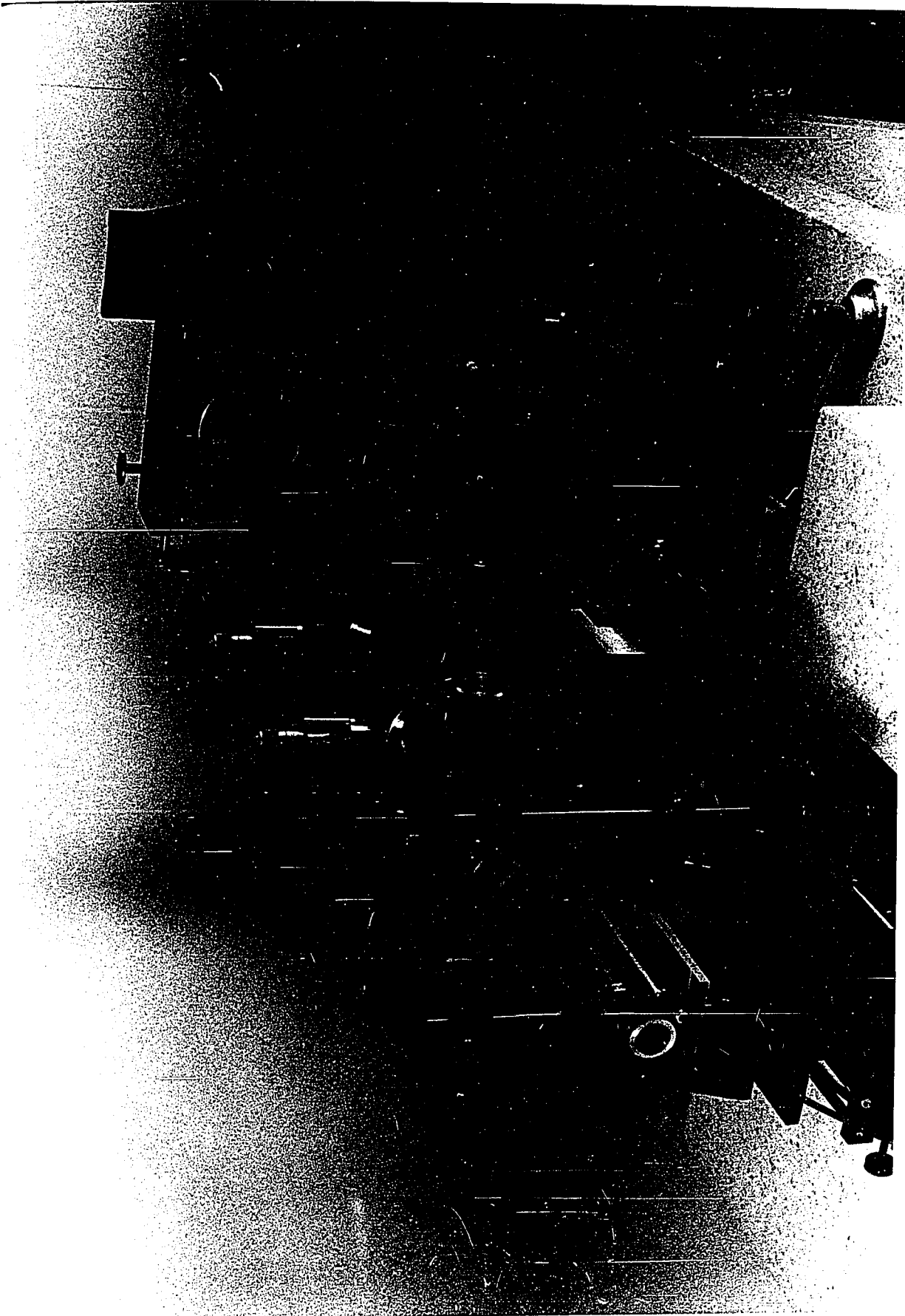


Figure 3.10 Système optique pour former et photographier la figure de diffraction.

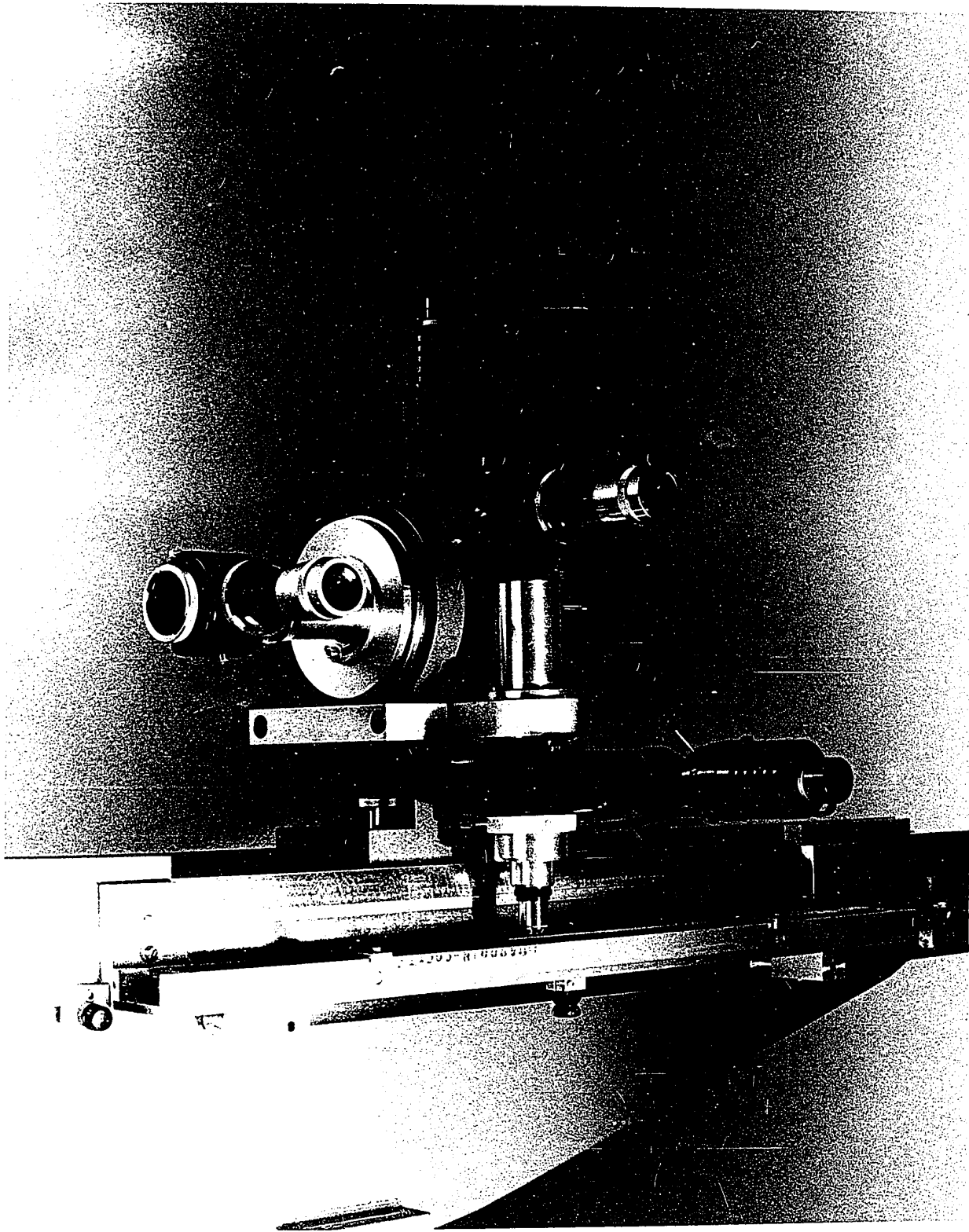


Figure 3.11 Unité optique pour mesurer les distances sténopé-masque et masque-plaque photographique.

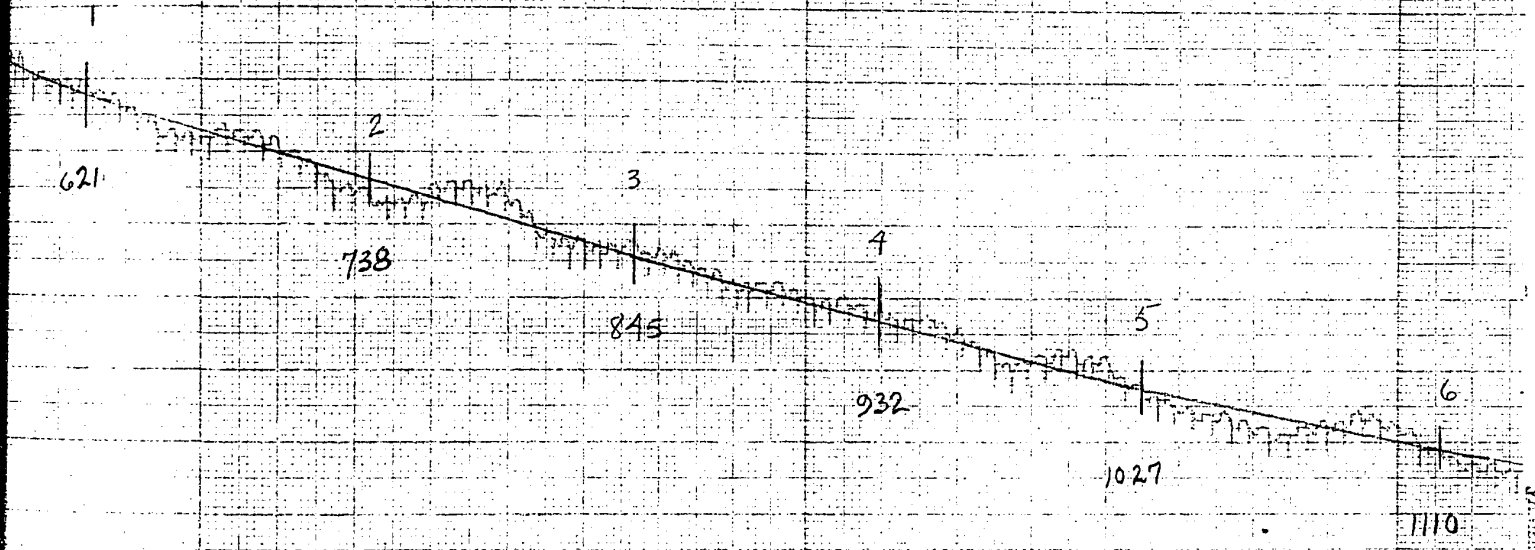


Figure 3.12 Echantillon de la courbe de densité optique provenant d'une frange couvrant une longueur de 5 mètres sur l'enregistrement; chacune des impulsions vers le bas sur la courbe correspond à un déplacement de $\lambda/2$ (≈ 0.3 micron). Le grandissement par rapport à la plaque photographique se situe aux environs de 75,000 X.

CHAPITRE 4

4.1 Discussion

Le programme sur ordinateur utilisé pour les calculs théoriques et le traitement des données expérimentales est inclus en appendice. Il servira de référence dans la discussion qui suit.

Lorsqu'on compare les résultats expérimentaux avec l'une ou l'autre des deux théories, il faut tenir compte de plusieurs sources d'erreur. La première provient de l'incertitude sur les paramètres, a , b et λ ; elle affecte les calculs théoriques des interfranges et des abscisses des franges. Cette erreur est indiquée dans le programme (voir appendice II) sous la rubrique "Young Erreur". La valeur donnée est l'erreur théorique sur la position de la frange. Nous pouvons admettre que la limite de précision des calculs théoriques est bien déterminée.

La deuxième source d'erreur provient de l'incertitude sur la position des franges sur l'enregistrement graphique. Pour localiser le centre des franges, nous avons eu recours aux deux méthodes décrites précédemment dans la section 3.4. La limite de précision de la méthode des moindres carrés peut être évaluée en examinant la déviation du centre des franges pour différentes valeurs de l'ordre n du lissage (l'ordre n est noté "IP" dans le programme

en appendice). L'approximation associée à un lissage d'ordre n est médiocre lorsque n est trop petit ou trop grand. Le premier cas qui est bien connu, est celui de l'approximation d'une courbe par une droite, pour $n = 1$; une parabole, pour $n = 2$;.... L'approximation devient meilleure lorsque n croît mais en pratique le lissage cesse d'être efficace lorsque n est trop élevé car on fait jouer un rôle trop important aux menus défauts de la courbe expérimentale. Pour ces raisons et après examen des valeurs des abscisses des centres pour les lissages d'ordre 3 à 15, nous avons décidé de ne tenir compte que des lissages d'ordre 6 à 15. Pour chaque frange, nous avons fait la moyenne des abscisses des centres trouvées à l'aide de ces lissages et nous proposons cette moyenne comme valeur la plus probable pour la position du centre. On trouve alors que la moyenne des déviations des abscisses du centre pour les différents lissages est inférieure à 3 microns dans le cas de la première frange et se réduit à une fraction de micron pour la frange d'ordre 6 (voir programme en appendice).

De plus, les positions des franges sont affectées par une erreur systématique constante. Elle est causée par l'incertitude sur la position du bord diffringent lors de la deuxième exposition de la plaque photographique. Cette incertitude a été évaluée à 2 microns. En raison de la géométrie du système optique, elle est projetée sur la plaque photographique et agrandie

à 3 microns. L'erreur étant partagée de part et d'autre du centre de symétrie, sa contribution maximale à l'erreur sur la position d'une frange peut être évaluée à un micron et demi.

Il existe un troisième facteur concernant la précision sur la position des franges, dont l'effet est assez difficile à évaluer. L'information contenue sur la plaque photographique n'est pas fidèlement reproduite sur l'enregistrement graphique. Une certaine distortion de cette information est produite par différents défauts de la plaque, notamment par des poussières déposées sur l'émulsion et par les plages d'interférence visibles sur la reproduction (figure 3.7). Ces plages sont larges et ont un faible contraste; elles sont dues à l'interférence dans l'émulsion, de la lumière incidente et de la lumière qui ayant traversé l'émulsion, a été réfléchi par la face postérieure de la plaque de verre servant de support à l'émulsion. Les larges plages d'interférence affectent la méthode de convergence; elles produisent de faibles gradients de densité optique qui ont pour effet de déformer la courbe médiane de la frange analysée. Les poussières sur l'émulsion affectent principalement la méthode des moindres carrés. Elles produisent de petites variations aléatoires de densité optique, qui se superposent à la densité optique représentant le phénomène de diffraction analysé. On est alors conduit à effectuer graphiquement un lissage sur la courbe expérimentale de densité optique afin d'en éliminer

les menus défauts. La courbe ainsi obtenue montre un tracé continu, facilitant la lecture des points qui seront donnés à l'ordinateur pour la détermination des abscisses des centres des franges par la méthode des moindres carrés. Nous avons constaté que de petites variations dans le tracé de cette courbe de lissage autour du point de densité optique maximum, produisent des déplacements importants de la position du centre de la frange déterminée par cette méthode. Une très grande prudence a été requise lors de ce lissage graphique afin de minimiser les influences subjectives de l'expérimentateur; en particulier, cette courbe a été constituée par des arcs distincts qui ont toujours été tracés en partant d'une région de faible densité optique et en allant vers une région de forte densité. Lors de l'analyse des deux premières plaques photographiques (diffraction par un demi-plan, exposition simple) nous n'avons pas pris toutes ces précautions relatives au tracé de la courbe de lissage graphique et c'est ainsi que nous expliquons les écarts entre la théorie de Fresnel et les résultats expérimentaux. Il est assez difficile d'évaluer quel peut être l'écart maximum causé par les variations subjectives du tracé de la courbe de lissage graphique. Après un certain entraînement de la part de l'expérimentateur, nous croyons que cet écart ne dépasse pas 5 microns dans les cas des franges les plus larges.

L'écart maximum admissible entre la théorie et l'expérience est obtenu en additionnant les contributions des diverses

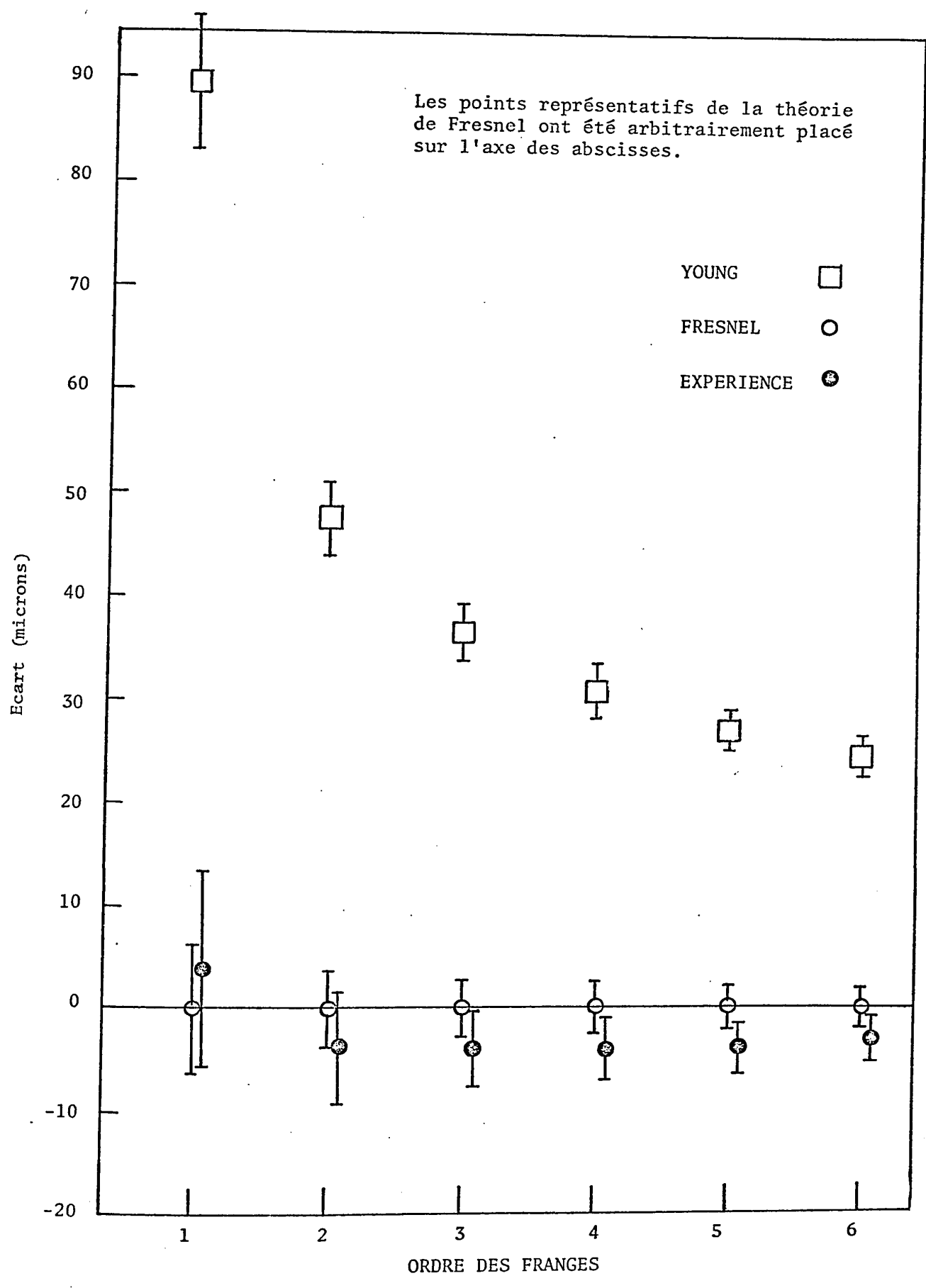
sources d'erreur que nous venons de décrire. Cette opération est illustrée dans le tableau V; elle s'applique à la figure de diffraction du tableau III et du programme en appendice. La figure 4.1 illustre graphiquement l'écart entre les deux théories. Ce diagramme situe les résultats expérimentaux par rapport aux calculs théoriques tout en indiquant la marge d'erreur admissible.

TABLEAU V

TABLEAU ANALYTIQUE DES DIVERSES CAUSES D'ERREUR (ENR. # 4)

<u>CAUSES D'ERREUR</u>	<u>VALEURS EN MICRONS DE L'ERREUR EN FONCTION DE L'ORDRE DES FRANGES</u>						
	ORDRE	1	2	3	4	5	6
CALCULS THEORIQUES							
(erreur sur a, b, λ)		6.2	3.6	2.8	2.3	2.1	1.9
RESULTATS EXPERIMENTAUX							
a) méthode des moindres carrés		3.0	1.0	0.7	0.4	0.4	0.3
b) Erreur systématique		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
c) Tracé subjectif de la courbe de lissage		5.0	3.0	1.5	1.0	0.7	0.5
Total de a), b) et c)		9.5	5.5	3.7	2.9	2.6	2.3

Figure 4.1 Ecart entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées d'après les théories de Young et Fresnel



APR 1961

4.2 Conclusion

L'examen des tableaux II et III ainsi que de la figure 4.1 ne laisse aucun doute, la formulation classique de la théorie de Young ne peut expliquer les résultats expérimentaux obtenus; par contre, la théorie de Fresnel s'accorde avec les valeurs expérimentales aux erreurs d'expérience près. Si nous admettons que la théorie de Fresnel conduit à une formulation satisfaisante du phénomène de diffraction nous pouvons nous poser la question: est-elle la seule valable?

Les résultats expérimentaux nous conduisent à rejeter la formulation classique de la théorie de Young mais nous ne devons pas éliminer la possibilité que cette théorie contienne quand même une part de vérité. Intuitivement on est amené à penser qu'il doit être possible de formuler le phénomène de diffraction en terme de la superposition sur l'onde incidente d'une onde de diffraction en provenance de la source de perturbation du front d'onde incident, en l'occurrence les bords de la pupille. Pour justifier cette assertion il suffit de mentionner que c'est la présence des bords de la pupille qui cause la diffraction. Si ceux-ci sont reportés très loin de la droite source-point d'observation, le phénomène disparaît. On peut donc supposer que la perturbation de l'état lumineux incident en un point P du plan d'observation est donnée par la somme des perturbations du front d'onde dans la pupille de diffraction, compte

tenu de leurs atténuations lorsqu'elles arrivent au point P. Dans la théorie de Fresnel, les limites d'intégration c'est-à-dire les bords de la pupille, jouent encore les rôles de perturbateurs du front d'onde.

Nous avons inclus en appendice Ia une autre théorie de la diffraction qui s'apparente à l'idée de Young. Celle-ci non seulement supporte l'idée de Young mais de plus, relie les deux conceptions du phénomène de la diffraction, c'est-à-dire celle de Young et celle de Fresnel.

L'étude présente n'est qu'une amorce du vaste projet de recherches que pourrait constituer l'analyse de toutes les théories de la diffraction afin de déterminer laquelle correspond le plus à la réalité expérimentale. Certains raffinements pourraient être apportés à la méthode expérimentale; entre autres, il serait bon d'étudier l'influence des paramètres a et b non seulement sur la position des franges mais aussi sur leur forme.

Nous pouvons conclure en disant que les résultats expérimentaux qui sont conformes à la théorie de Fresnel, semblent démontrer que la formulation de Young du phénomène de la diffraction de la lumière est incorrecte mais il faudrait se garder de rejeter du même coup son interprétation qualitative du phénomène.

APPENDICE I

Polynomes de Chebyshev $T_i(x)$, $i = 1, \dots, 12$

$$T_0(x) = 1$$

$$T_1(x) = x$$

$$T_2(x) = 2x^2 - 1$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x$$

$$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$$

$$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x$$

$$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 8x^2 - 1$$

$$T_7(x) = 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$$

$$T_8(x) = 128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1$$

$$T_9(x) = 256x^9 - 576x^7 + 432x^5 - 120x^3 + 9x$$

$$T_{10}(x) = 512x^{10} - 1280x^8 + 1120x^6 - 400x^4 + 50x^2 - 1$$

$$T_{11}(x) = 1024x^{11} - 2816x^9 + 2816x^7 - 1232x^5 + 220x^3 - 11x$$

$$T_{12}(x) = 2048x^{12} - 6144x^{10} + 6912x^8 - 3584x^6 + 840x^4 - 72x^2 + 1$$

APPENDICE Ia

Il existe une formulation de la théorie de Young que l'on retrouve dans Born and Wolf⁷, Andrews⁸ et dont Rubinowicz⁹ nous donne une démonstration très élégante. Expriment la formulation de Kirchhoff sous la forme,

$$U(P) = \iint_S \vec{V}(P,Q) \cdot \vec{n} \, dS_Q \quad (4.1)$$

où $U(P)$ est l'état lumineux au point P ; S la surface de la pupille, Q un point de S et $\vec{V}(P,Q)$, le vecteur champ dans la pupille tel que vu par le point P . Puisque le vecteur champ obéit à l'équation d'Helmholtz

$$\nabla_Q \cdot \vec{V}(P,Q) = 0 \quad (4.2)$$

on peut trouver un vecteur potentiel $\vec{W}(P,Q)$ tel que

$$\vec{V}(P,Q) = \nabla_Q \times \vec{W}(P,Q) \quad (4.3)$$

Alors

$$U(P) = \iint_S \nabla_Q \times \vec{W}(P,Q) \cdot \vec{n} \, dS_Q \quad (4.4)$$

Utilisant le théorème de Stokes, on obtient

$$U(P) = \int_{\Gamma} \vec{W}(P,Q) \cdot d\vec{s}_Q \quad (4.5)$$

où Γ est un contour fermé délimitant la surface S .

L'équation (4.1) exprime l'idée de Fresnel tandis que l'équation (4.5) s'apparente à l'idée de Young, le théorème de Stokes servant de pont entre les deux. La première difficulté de cette formulation (eq. 4.5) est l'évaluation du vecteur potential, lequel est donné par une équation différentielle assez complexe. Il existe cependant des solutions analytiques dans certains cas, entre autres celui d'une onde sphérique incidente sur la pupille de diffraction. Une seconde difficulté provient de la fonction vectorielle $\vec{W}(P,Q)$; celle-ci possède certaines discontinuités qui rendent difficile l'évaluation de l'intégrale de l'équation 4.5.

APPENDICE II

Nous avons cru bon d'inclure en appendice le programme développé pour les calculs théoriques et le traitement des données, afin de permettre un examen détaillé des méthodes de calcul.

(suit le programme en question).

```

C
C # 8-D
C FRANGES D'INTERFERENCE PRODUITES PAR UN BORD
C CALCUL SELCN YOUNG ET FRESNEL
C (TOUS LES CALCULS SONT FAITS EN MILLIMETRES)
C MAXIMUM N=150, MAXIMUM IP=15
C M=NCMBRE DE FRANGES
C
0001 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
0002 REAL*8 LAMDA
0003 DIMENSION DATA(450),WORK(136),CC(15),CX(15),LABEL(30),THEO(5,6),
1 RAC(1,2,15)
0004 COMMON T
0005 DATA X,XY1,XF2,XFF,DX1 /5*0.00/
0006 READ(1,1) A,B,LAMDA,DA,DB,DL,LABEL,M
0007 FORMAT(6(D14.7,/),30A1,I5)
0008 WRITE(3,2)LABEL
0009 FORMAT(30X,'# R-B' /30X,'FRANGES D'INTERFERENCE PRODUITES PAR UN B
10RD' /30X,'CALCULS SELCN YOUNG ET FRESNEL' /30X,' (TOUTES LES DISTANC
2ES SONT EN MILLIMETRES)', /30X,30A1)
0010 IP=15
0011 STEP=5.0D-3*8/A
0012 T=DSQRT(2.00*A/(LAMDA*B*(A+B)))
0013 WRITE(3,3)A,B,LAMDA,DA,DB,DL
0014 FORMAT(/10X,'A=',D14.7/10X,'R=',D14.7/10X,'LAMDA=',D14.7
1/10X,'DA=',D14.7/10X,'DB=',D14.7/10X,'DL=',D14.7
1/15X,'-LEGENDE-' /15X,'LES VARIABLES X1,X2,X3 INDIQENT LES POSITI
1ONS RELATIVES AU BORD GEOMETRIQUE',
1 /15X,'LES VARIABLES D1,D2 ET D3 SONT DES INTERFRANGES'
1 /15X,'IP EST LE DEGRE DES POLYNOMES DE CHERYSHEV UTILISES DANS LE
1 LEAST SQUARE FIT' /15X,'DANS LES LIGNES COMPLETEES, X2 ET D3 SONT D
1ES MOYENNES POUR LES VALEURS DE IP DE 6-15'//)
0015 DO 9 I=1,M
C.....YOUNG
0016 A1=(1-0.5D0)*LAMDA-A
0017 A2=A*A+2.00*A*B+A1*A1
0018 A3=A+B
0019 XY=DSQRT(A2*A2/(4.00*A1*A1)-A3*A3)
0020 DXY=XY-XY1
C.....CALCUL D'ERREUR
0021 DXA=(A2/(2.00*C*A1)*((A3-A1)/A1+A2/(2.00*A1*A1))-A3)/XY
0022 DXD=(A2*A/(2.00*A1*A1)/A3)/XY
0023 DXL= A2/(A1**2.00)*((1.00-A2/(2.00*A1*A1))/XY*(1-0.5D0)

```

```

0024 DX=DABS(DXA*(A)+DABS(DXD*DB)+DABS(DXL*DL))
0025 DD X=DX
C.....FRESNEL
4 X=X+STEP
CALL FUNC(YF,X)
IF(YF.GT.YF2)GO TO 5
YF2=YF
GO TO 4
5 X=X+STEP
CALL FUNC(YF,X)
IF(YF.LT.YF2) GO TO 6
YF1=YF2
YF2=YF
GO TO 5
6 X1=X-2.D0*STEP
X2=X-STEP
X3=X
Y1=YF1
Y2=YF2
Y3=YF
YF2=YF
C.....RACINE POUR FRESNEL
NF=1
C1=((Y3-Y2)/(X3-X2)-(Y2-Y1)/(X2-X1))/(X3-X1)
C2=((Y2-Y1)/(X2-X1)-C1*(X2+X1)
XF1=-C2/(2.D0*C1)
NF=NF+1
7 CALL FUNC(YF,XF1)
Y1=Y3
Y3=Y2
Y2=YF
X1=X3
X3=X2
X2=XF1
C1=((Y3-Y2)/(X3-X2)-(Y2-Y1)/(X2-X1))/(X3-X1)
C2=((Y2-Y1)/(X2-X1)-C1*(X2+X1)
XF=-C2/(2.D0*C1)
IF(DABS(XF-XF1).LT.0.1D-5) GO TO 8
XF1=XF
GO TO 7
8 DXF=XF-XFF
DXYF=DXF-DXF
C.....STORAGE

```

```

CC64 THEO(1,I)=XY
CC65 THEO(2,I)=DXY
CC66 THEO(3,I)=DXYF
CC67 THEO(4,I)=XF
CC68 THEO(5,I)=DXF
CC69 THEO(6,I)=DX
CC70 XYI=XY
CC71 XFF=XF
CC72 DXI=DX
CC73 CONTINUE
9
C .....CALCUL EXPERIMENTAL
C .....1) CALCUL DU CENTRE DES FRANGES
MM=2*M
CC74 DO 12 I=1,MM
CC75 READ(1,10)N,START
CC76 FORMAT(15,F5.0)
CC77 STE=8. DO*LAMCA
CC78 START=START*STE
CC79 M1=3*M
CC80 M2=(IP+1)*(IP+2)/2
CC81 CALL ANA(M1,M2,IP,START,STE,DATA,WORK,CC,CX)
CC82 DO 11 J=3,IP
CC83 RAC(I,J)=CX(J)
CC84 CONTINUE
CC85
C .....POSITION DE CHACUN DES MAXIMA
CC86 WRITE(3,148)
CC87 FORMAT(5X,'POSITION DE CHACUN DES MAXIMA',5X,'COORDONNEES ARBITRAI
RES',5X,'FRANGES',5X,'POSITIONS')
DO 151 I=1,MM
AMCY=0.00
CC88 DO 149 J=6,IP
CC89 AMCY=AMCY+RAC(I,J)
CC90 AMCY=AMCY/1.0D1
CC91 WRITE(3,150)I,AMCY
CC92 FORMAT(8X,I2,5X,F10.6)
CC93 CONTINUE
CC94
C .....2) POSITION DU BORD GEOMETRIQUE
CC95 WRITE(3,13)
CC96 FORMAT(20X,'CALCUL DE LA POSITION DU BORD GEOMETRIQUE',/24X,'N',8X
1,IP,8X,'ORIGINE',/)
CENT=0.00
CC98 DO 17 I=1,M
CC99 CENT=0.00
C100

```

```

0101 DO 15 J=3,IP
0102 CEN=(RAC(I,J)+RAC(I+M,J))/2.0D0
0103 WRITE(3,14)I,J,CEN
0104 FCRMAT(20X,15,5X,15,5X,F10.6)
0105 IF(J.LT.6)GO TO 15
0106 CENTRE=CENTRE+CEN
0107 CONTINUE
0108 CENTRE=CENTRE/1.0D1
0109 WRITE(3,16)I,CENTRE
0110 FCRMAT(20X,15,6X,'MOYENNE',2X,F10.6/)
0111 IF(I.LT.2)GO TO 17
0112 CENT=CENT+CENTRE
0113 CCNTINUE
0114 CENTRE=CENT/5.0D0
C .....3) POSITION DES FRANGES RELATIVE AU BORD GEOMETRIQUE
C115 DO 35 K=1,3
C116 GO TO (19,20,22),K
C117 WRITE(3,19)
C118 FCRMAT(//,10X,'SERIE NEGATIVE//)
C119 GO TO 24
C120 WRITE(3,21)
C121 FCRMAT(//,10X,'SERIE POSITIVE//)
C122 GO TO 24
C123 WRITE(3,23)
C124 FCRMAT(//,10X,'SERIE MOYENNE//)
C125 WRITE(3,25)
C126 FCRMAT(
2 15X,'THEORIE DE YOUNG',12X,'THEORIE DE FRESNEL',14X,'EXPERIENCE
3',11X,'YOUNG',3X,'N',6X,'X1',9X,'D1',8X,'D1-D2',9X,'X2',9X,
4'D2',9X,'IP',6X,'X3',9X,'D3',9X,'ERREUR')
DO 26 I=3,IP
C127 CC(I)=0.0D0
C128 EMCY1=0.0D0
C129 DO 34 J=1,M
C130 EMCY=0.0D0
C131 DO 31 I=3,IP
C132 GO TO (27,28,29),K
C133 CX(I)=CENTRE-RAC(J,I)-CC(I)
C134 CC(I)=CENTRE-RAC(J,I)
C135 GO TO 30
C136 CX(I)=RAC(J+M,I)-CENTRE-CC(I)
C137 CC(I)=RAC(J+M,I)-CENTRE
C138 GO TO 30
C139

```

```
0140 CX(I)=(RAC(J+M,I))-RAC(J,I))/2.00-CC(I)
0141 CC(I)=(RAC(J+M,I))-RAC(J,I))/2.00
0142 IF(I.LT.6)GO TO 31
0143 EMOY=EMOY+CC(I)
0144 CCNTINUE
0145 EMOY=EMOY/1.0D1
0146 DEMOY=EMOY-EMOY1
0147 EMOY1=EMOY
0148 WRITE(3,32)J,(THEO(I,J),I=1,5),EMOY,DEMOY,THEO(6,J)
0149 FORMAT(//1X,13,2X,3(F10.6,1X),1X,2(F10.6,1X),
        13X,F10.6//)
0150 WR ITE(3,33)(I,CC(I),CX(I),I=3,IP)
0151 FCRMAT(66X,12,1X,F10.6,1X,F10.6)
0152 CONTINUE
0153 CONTINUE
0154 RETURN
0155 END
```

C001

SUBROUTINE ANA(M1,M2,IP,START,STEP,DATA,WORK,CC,CX)

C

'LEAST SQUARE FIT' D'ORDRE IP EN POLYNOMES DE CHEBYSHEV

-CALCUL DE LA POSITION DU MAXIMUM CENTRAL

VARIABLES: M1=3*N (N=NUMBER DE POINTS LUS)

M2=(IP+1)*(IP+2)/2

IP=ORDRE DU 'LEAST SQUARE FIT'

START=VALEUR DU PREMIER X

STEP=INTERVALLE ENTRE LES X

RACINE=POSITION DU MAXIMUM

C

C002

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

C003

DIMENSION DATA(M1),WORK(M2),CC(IP),CX(IP)

C ***INITIALISATION

IOP=2

EPS=1.0D-15

ETA=1.0E-15

N=M1/3

I1=N+1

I2=2*N

READ(1,1)(DATA(I),I=I1,I2)

FORMAT(15F5.0)

DO 2 I=1,N

DATA(I)=START+(I-1)*STEP

DATA(I2+I)=1.

CCONTINUE

C

C ***LEAST SQUARE FIT

CALL DAPCH(DATA,N,IP,XD,XD,WORK,IER)

CALL DAPFS(WORK,IP,IRES,IOP,EPS,ETA,IER)

STEP1=STEP

START1=START

K=IRES

DO 12 IRES=3,K

J=IRES*(IRES-1)/2

DO 3 I=1,IRES

CC(I)=WORK(J+I)

CCONTINUE

C

C ***POSITION DU MAXIMUM (LOCALISATION GROSSIERE)

ITEST=1

STEP=STEP1/5.00

START=START1+15.00*STEP

X=START

Y2=0.00

C026

C027

C028

C029

C030

```

CC31 X=X+STEP
CC32 XC=XD*X+XD
0033 CALL DCNPS(Y,XC,CC, IRES)
CC34 IF(Y.LT.Y2) GO TO 8
0035 Y1=Y2
0036 Y2=Y
CC37 GO TO 6
C *** ** POSITION DU MAXIMUM (LOCALISATION FINE)
0038 X1=X-2.00*STEP
CC39 X2=X-STEP
0040 X3=X
0041 Y3=Y
CC42 C1=((Y3-Y2)/(X3-X2)-(Y2-Y1)/(X2-X1))/(X3-X1)
CC43 C2=((Y2-Y1)/(X2-X1)-C1*(X2+X1))
0044 XF1=-C2/(2.00*C1)
CC45 XC=XD*XF1+XD
0046 CALL DCNPS(Y,XC,CC, IRES)
0047 Y1=Y3
CC48 Y2=Y2
0049 Y2=Y
0050 X1=X3
CC51 X3=X2
0052 X2=XF1
0053 C1=((Y3-Y2)/(X3-X2)-(Y2-Y1)/(X2-X1))/(X3-X1)
CC54 C2=((Y2-Y1)/(X2-X1)-C1*(X2+X1))
CC55 XF=-C2/(2.00*C1)
0056 IF (DABS((XF-XF1)/XF).LT.0.1D-5) GO TO 11
CC57 XF1=XF
0058 GO TO 9
0059 IF(ITEST.EQ.2)GO TO 13
CC60 ITEST=2
0061 RACIN1=XF
0062 START=XF+(XF-START)/2.0D0
CC63 STEP=-STEP
0064 GO TO 4
CC65 RACIN2=XF
CC66 IF(DABS(RACIN2-RACIN1).LT.1.0D-5)GO TO 15
0067 RACINE=(RACIN1+RACIN2)/2.0D0
CC68 WRITE(3,14) IRES, RACIN1, RACIN2, RACINE
CC69 FORMAT(1X, 'ATTENSION', 2X, I2, 3(2X, F10.6))
0070 CX(IRES)=RACINE
CC71 GC TO 12
0072 CX(IPES)=RACIN1

```

FCRTRAN IV G LEVEL 21

ANA

DATE = 72330

13/46/40

PAGE

C073 CONTINUE
C074 RETURN
C075 END

```

0001 SUBROUTINE FUNC(Y,X)
0002   DIFFRACIION DE FPESNEL PAR UN BORD A L'ORIGINE
0003   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
0004   COMMON T
0005   U=-T*X
0006   CALL DCS(C,S,U)
0007   Y=(0.5D0-C)*(0.5D0-C)+(0.5D0-S)*(0.5D0-S)
0008   RETURN
0009   END

```

```

0001 C SUBROUTINE DCS (C,S,X)
0002 C SOURCELINE AMELIOREE
0003 C IMPLICIT REAL*8(A-H,D-Z)
0004 C Z=3.14159265358979D0*X*X/2.0D0
0005 C D=DCOS(Z)
0006 C S=DSIN(Z)
0007 C IF(Z-4.0D0)1,1,2
0008 C Z=Z/4.0D0
0009 C A=(((0.034404779D0)*Z-0.150230960D0)*Z-0.025639041D0)*Z
1+C.850663781D0)*Z-0.075752419D0)*Z-3.050485660D0)*Z-0.016898657D0)
2*Z+6.920691902D0)*Z-0.000576361D0)*Z-6.808568854D0)*Z-0.000001702D
30)*Z+1.595769140D0
0010 C B=(((0.019547031D0)*Z-0.216195929D0)*Z+0.702222015D0)*Z
1-0.403349276D0)*Z-1.363729124D0)*Z-0.138341947D0)*Z+5.075161298D0)
2*7-0.009520895D0)*Z-7.780020400D0)*Z-0.000092810D0)*Z+4.255387524D
30)*Z-0.000000033D0
0011 C Z=DSQRT(Z)
0012 C C=Z*(D*A+S*B)
0013 C S=Z*(S*A-D*B)
0014 C IF(X)3,4,4
0015 C Z=4.0D0/Z
0016 C A=(((0.000233939D0)*Z-0.001217930D0)*Z+0.002102967D0)*Z
1+0.000246420D0)*Z-0.006748873D0)*Z+0.011948809D0)*Z-0.009497136D0)
2*Z+0.000689892D0)*Z+0.005770956D0)*Z+0.000003936D0)*Z-0.024933975D
30)*Z
0017 C B=(((0.000838386D0)*Z-0.005598515D0)*Z+0.016497308D0)*Z
1-0.027928955D0)*Z+0.029064067D0)*Z-0.017122914D0)*Z+0.001903218D0)
2*Z+0.004851466D0)*Z+0.000023006D0)*Z-0.009351341D0)*Z+0.00000023D
30)*Z+0.199471140D0
0018 C Z=DSQRT(Z)
0019 C C=5.0D-1+Z*(D*A+S*B)
0020 C S=5.0D-1+Z*(S*A-D*B)
0021 C IF(X)3,4,4
0022 C C=-C
0023 C S=-S
0024 C RETURN
END

```

8-B
 FRANGES D'INTERFERENCE PRODUITES PAR UN BORD
 CALCULS SELON YOUNG ET FRESNEL
 (TOUTES LES DISTANCES SONT EN MILLIMETRES)
 ENREGISTREMENT # 4

A= 0.9954237D 03
 B= 0.4500200D 03
 LAMDA= 0.6328222D-03
 DA= 0.1050000D-01
 DB= 0.4000000D-02
 DL= 0.1500000D-09

-LEGENDE-

LES VARIABLES X1, X2, X3 INDIQUENT LES POSITIONS RELATIVES AU BORD GEOMETRIQUE
 LES VARIABLES D1, D2 ET D3 SONT DES INTERFRANGES
 IP EST LE DEGRE DES POLYNOMES DE CHEBYSHEV UTILISES DANS LE LEAST SQUARE FIT
 DANS LES LIGNES COMPLETES, X3 ET D3 SONT DES MOYENNES POUR LES VALEURS DE IP DE 6-15

POSITION DE CHACUN DES MAXIMA

CCCRDCNNEES FRANGES	ARBITRAIRES POSITIONS
1	1.629574
2	1.128976
3	0.790352
4	0.523509
5	0.292604
6	0.082817
7	2.744157
8	3.252943
9	3.584913
10	3.856923
11	4.089277
12	4.293964

N	IP	ORIGINE
1	3	2.184680
1	4	2.183050
1	5	2.193288
1	6	2.184709
1	7	2.185526
1	8	2.185493
1	9	2.185653
1	10	2.185248
1	11	2.185229
1	12	2.187283
1	13	2.188572
1	14	2.190165
1	15	2.190776
1	MOYENNE	2.186865
2	3	2.188125
2	4	2.189193
2	5	2.188751
2	6	2.189029
2	7	2.189160
2	8	2.190577
2	9	2.190598
2	10	2.191581
2	11	2.192426
2	12	2.192395
2	13	2.191899
2	14	2.193223
2	15	2.193707
2	MOYENNE	2.191459
3	3	2.187051
3	4	2.187896
3	5	2.187649
3	6	2.197047
3	7	2.187051
3	8	2.186916
3	9	2.186944
3	10	2.187902
3	11	2.187930
3	12	2.188381
3	13	2.188264
3	14	2.187912
3	15	2.187875
3	MOYENNE	2.187632

SERIE NEGATIVE

N X1 THEORIE DE YOUNG D1 D1-D2 THEORIE DE FRESNEL X2 D2 IP

EXPERIENCE X3 D3 YOUNG ERREUR

1	0.643063	0.643063	0.089586	0.553477	0.553477	0.560254	0.560254	0.006221
						0.553611	0.553611	
						0.555504	0.555504	
						0.555114	0.555114	
						0.561230	0.561230	
						0.562120	0.562120	
						0.560970	0.560970	
						0.560426	0.560426	
						0.559910	0.559910	
						0.559937	0.559937	
						0.559258	0.559258	
						0.559324	0.559324	
						0.559808	0.559808	
						0.559558	0.559558	

2	1.113819	0.470756	-0.041838	1.066071	0.512594	1.050852	0.500507	0.003593
						1.066363	0.512752	
						1.063216	0.507711	
						1.064093	0.508979	
						1.064134	0.502904	
						1.063931	0.501811	
						1.062044	0.501074	
						1.061981	0.501554	
						1.060714	0.500804	
						1.059257	0.499320	
						1.059122	0.499864	
						1.060352	0.501027	
						1.058681	0.498874	
						1.058300	0.498742	

3	1.437935	0.324116	-0.011223	1.401410	0.335339	1.399476	0.338624	0.002784
						1.400092	0.333728	
						1.398257	0.335041	
						1.398775	0.334682	
						1.398999	0.334865	
						1.399035	0.335104	
						1.399698	0.337655	
						1.399664	0.337683	
						1.399451	0.338737	
						1.399355	0.340098	
						1.399352	0.340230	
						1.399351	0.338999	
						1.399917	0.341236	
						1.399935	0.341635	

4	1.701388	0.263454	-0.005806	1.670670	0.269260	1.666319	0.266843	0.002354
						1.657708	0.267616	
						1.667275	0.269018	
						1.667595	0.268819	
						1.657976	0.268976	
						1.667947	0.268912	
						1.667232	0.267534	
						1.657034	0.267370	
						1.666047	0.266596	
						1.666177	0.266823	
						1.654890	0.265539	
						1.665644	0.266294	
						1.665034	0.265117	
						1.655211	0.265276	

5	1.929195	0.227806	-0.003696	1.902171	0.231502	1.897223	0.230904	0.002077
						1.898147	0.230439	
						1.897738	0.230463	
						1.898040	0.230445	
						1.898611	0.230636	
						1.898614	0.230667	
						1.898256	0.231024	
						1.899232	0.231198	
						1.897423	0.231376	
						1.897284	0.231106	
						1.896397	0.231507	
						1.896277	0.230633	
						1.895561	0.230527	
						1.895579	0.230369	

6	2.132806	0.203612	-0.002617	2.108400	0.206228	2.106010	0.208787	0.001879
						2.104700	0.206554	
						2.105351	0.207613	
						2.104926	0.206887	
						2.104688	0.206077	
						2.104648	0.206034	
						2.105331	0.207075	
						2.105467	0.207235	
						2.105931	0.208508	
						2.106137	0.208854	
						2.106372	0.209975	
						2.106814	0.210527	
						2.106813	0.211252	
						2.107901	0.212322	

SERIE POSITIVE

N	THEORIE DE YOUNG		THEORIE DE FRESNEL		EXPERIENCE		YOUNG ERREUR
	X1	D1-D2	X2	D2	X3	D3	
1	0.643063	0.089586	0.553477	0.553477	0.554330	0.554330	0.005221
					0.543316	0.543316	
					0.541949	0.541949	
					0.542034	0.542034	
					0.550994	0.550994	
					0.553517	0.553517	
					0.552300	0.552300	
					0.552076	0.552076	
					0.550750	0.550750	
					0.550740	0.550740	
					0.554159	0.554159	
					0.556814	0.556814	
					0.560481	0.560481	
					0.551455	0.551455	
2	1.113819	0.470756	1.066071	0.512594	1.064115	0.509786	0.003593
					1.062958	0.519642	
					1.062345	0.520396	
					1.061940	0.519906	
					1.062526	0.511542	
					1.062595	0.509078	
					1.063543	0.511243	
					1.063522	0.511446	
					1.064220	0.513471	
					1.064453	0.513713	
					1.064257	0.510088	
					1.064494	0.507681	
					1.065472	0.504990	
					1.0656058	0.504603	

3 1.437935 0.324116 -0.011223 1.401410 0.335339 1.395085 0.330970 0.002784

3 1.394538 0.331580
4 1.394393 0.332048
5 1.394418 0.332478
6 1.393438 0.330902
7 1.393482 0.330887
8 1.393875 0.330332
9 1.393896 0.330374
10 1.395600 0.331380
11 1.395559 0.331106
12 1.396459 0.332201
13 1.396424 0.331929
14 1.396086 0.330615
15 1.396030 0.329972

4 1.701388 0.263454 -0.005806 1.670670 0.269250 1.667095 0.272010 0.002354

3 1.662609 0.268071
4 1.665203 0.270810
5 1.664480 0.270063
6 1.666225 0.272786
7 1.666056 0.272574
8 1.666972 0.273097
9 1.666729 0.272833
10 1.667709 0.272108
11 1.667156 0.271607
12 1.667718 0.271259
13 1.667276 0.270852
14 1.667567 0.271481
15 1.667535 0.271505

5	1.929195	0.227806	-0.003696	1.902171	0.231502	1.899449	0.232354	0.002077
						1.897347	0.234738	
						1.900611	0.235408	
						1.899833	0.235353	
						1.900551	0.234326	
						1.900233	0.234177	
						1.899587	0.232615	
						1.899329	0.232600	
						1.899112	0.231403	
						1.898971	0.231806	
						1.899192	0.231475	
						1.899105	0.231829	
						1.899239	0.231672	
						1.899172	0.231637	

6	2.122806	0.203612	-0.002617	2.108400	0.206228	2.104136	0.204687	0.001879
						2.104082	0.206735	
						2.102488	0.201877	
						2.103462	0.203629	
						2.103605	0.203055	
						2.103661	0.203427	
						2.104075	0.204488	
						2.104231	0.204903	
						2.104048	0.204936	
						2.104228	0.205257	
						2.104242	0.205049	
						2.104362	0.205257	
						2.104474	0.205236	
						2.104435	0.205264	

SERIE MOYENNE

N	X1	THEORIE DE YOUNG D1	D1-D2	THEORIE DE FRESNEL X2	D2	IP	EXPERIENCE X3	D3	YOUNG ERREUR
1	0.643063	0.643063	0.089586	0.553477	0.553477		0.557292	0.557292	0.006221
						3	0.548464	0.548464	
						4	0.548727	0.548727	
						5	0.548574	0.548574	
						6	0.556112	0.556112	
						7	0.557818	0.557818	
						8	0.556635	0.556635	
						9	0.556251	0.556251	
						10	0.555330	0.555330	
						11	0.555339	0.555339	
						12	0.556714	0.556714	
						13	0.558069	0.558069	
						14	0.560145	0.560145	
						15	0.560507	0.560507	
2	1.113819	0.470756	-0.041838	1.066071	0.512594		1.062483	0.505191	0.003593
						3	1.064661	0.516197	
						4	1.052780	0.514054	
						5	1.063017	0.514443	
						6	1.063335	0.507223	
						7	1.062263	0.505445	
						8	1.062793	0.506159	
						9	1.062751	0.506500	
						10	1.062467	0.507137	
						11	1.061855	0.506516	
						12	1.061690	0.504976	
						13	1.062423	0.504354	
						14	1.062077	0.501932	
						15	1.062179	0.501673	

3	1.437935	0.224116	-0.011223	1.401410	0.335339	1.397280	0.334797	0.002784
						1.397315	0.332654	
						1.396325	0.333544	
						1.396596	0.333580	
						1.396219	0.332884	
						1.396258	0.332995	
						1.396787	0.333993	
						1.396780	0.334029	
						1.397526	0.335058	
						1.397457	0.335602	
						1.397905	0.336215	
						1.397887	0.335464	
						1.398002	0.335925	
						1.397983	0.335802	

4	1.701388	0.263454	-0.005806	1.670670	0.269260	1.666707	0.269427	0.002354
						1.665159	0.267844	
						1.666239	0.269914	
						1.666037	0.269441	
						1.667100	0.270881	
						1.667001	0.270743	
						1.667102	0.270315	
						1.666881	0.270101	
						1.666878	0.269352	
						1.666672	0.269215	
						1.666304	0.268399	
						1.666460	0.268573	
						1.666301	0.268299	
						1.666373	0.268390	

5	1.929195	0.227806	-0.003696	1.902171	0.231502	1.898336	0.231629	0.002077
						1.897747	0.232588	
						1.899175	0.222936	
						1.898937	0.232899	
						1.899581	0.232481	
						1.899424	0.232422	
						1.898921	0.231820	
						1.898780	0.231899	
						1.898268	0.231390	
						1.898128	0.231456	
						1.897795	0.231491	
						1.897691	0.231231	
						1.897400	0.231099	
						1.897375	0.231003	

6	2.132806	0.203612	-0.002617	2.108400	0.206228	2.105073	0.206737	0.001879
						2.104391	0.206645	
						2.103920	0.204745	
						2.104194	0.205258	
						2.104147	0.204566	
						2.104154	0.204730	
						2.104703	0.205782	
						2.104849	0.206069	
						2.104990	0.206722	
						2.105183	0.207055	
						2.105307	0.207512	
						2.105588	0.207897	
						2.105644	0.208244	
						2.106168	0.208793	

BIBLIOGRAPHIE

1. Bruno Rossi, "Optics", Addison-Wesley, 1957.
2. M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, 1959.
3. Miles V. Klein, "Optics", John Wiley & Sons, 1970.
4. Information obtenue de Dr. B. Whitford, division de physique, NRC.
5. "Handbook of Chemistry and Physics, 51^{ième} édition, p. E-231.
6. Cornelius Lanczos, "Applied Analysis", Prentice Hall, 1956
Chapitre V, Section 13.
7. M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press,
1959, p. 448-452.
8. C.L. Andrews, "Optics of the electromagnetic spectrum",
Prentice-Hall, 1960, Chapitre XII.
9. Rubinowicz dans "Progress in Optics", Vol. IV, E. Wolf,
editeur; section V: The Miyamoto-Wolf diffraction wave.