

N° d'ordre : 1224

50376

1984

253

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

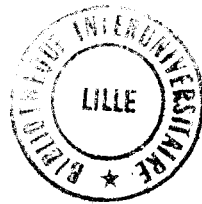
pour obtenir le titre de

DOCTEUR 3ème CYCLE

Spécialité : Automatique

par

Fabrice DANQUIGNY



ETUDE ET CONCEPTION D'UN DISPOSITIF DE REFRACTOMETRIE ET D'UN FRONTOFOMETRE AUTOMATIQUES

Soutenue le 19 novembre 1984 devant la Commission d'Examen

MM.	P.	VIDAL	Président
	J.G.	POSTAIRE	Examineur
	J.C.	HACHE	Examineur
	R.	VERGNES	Invité
	W.	LENNE	Invité

Dans le cadre de la collaboration entre le Service d'Exploration Fonctionnelle de la Vision du Centre Hospitalier Régional et le Laboratoire d'Automatique de l'Université de Lille 1, ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique Biologique de l'Université du Droit et de la Santé de Lille.

Je remercie Monsieur le Professeur Pierre VIDAL d'avoir accepté de présider le Jury.

A Monsieur le Professeur René VERGNES, responsable du Laboratoire de Biophysique, j'exprime ma reconnaissance pour la disponibilité qu'il a bien voulu m'accorder.

Je remercie Monsieur le Professeur Jean-Claude HACHE, Chef du Service d'Exploration Fonctionnelle de la vision, de m'avoir proposé ce travail et guidé dans sa réalisation.

Mes remerciements vont également à Monsieur William LENNE, Directeur du Service Recherche et Equipement de la Société ESSILOR, pour l'intérêt qu'il a porté au sujet, et à Monsieur le Professeur Jacques-Gérard POSTAIRE pour sa présence dans le Jury.

Que mes camarades de Laboratoire trouvent ici
le témoignage de ma sympathie. Je tiens particulièrement
à remercier Mireille SERVANT et Serge COEQUYT pour l'aide
qu'ils m'ont apportée pour la réalisation de ce mémoire,
Messieurs Régis BEUSCART, Patrick DUBOIS, Jean ROUSSEAU pour
leurs conseils, Mesdames Jacqueline VALET, Rolande LACOMBE
et Monsieur Pascal BRICHE pour leur aimable collaboration.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

I PRESENTATION DU PROJET

- I.1 Etude d'un réfractomètre automatique.
- I.2 Améliorations et solutions proposées.
 - I.2.1 Mesure de l'astigmatisme.
 - I.2.2 Rapidité et précision des mesures.
- I.3 Réalisation expérimentale.

II SIMULATION DU SYSTEME

- II.1 Choix de la méthode.
- II.2 Simplifications apportées.
 - II.2.1 Simplifications du schéma optique.
 - II.2.2 Simplification du calcul de l'éclairement.
- II.3 Etude du faisceau lumineux.
 - II.3.1 Dans le sens source-écran.
 - II.3.2 Dans le sens écran-source.
- II.4 Modélisation de l'éclairement.
 - II.4.1 Modèle de répartition uniforme.
 - II.4.2 Modèle de répartition de type convolutive.
 - II.4.3 Eclairement d'un point quelconque.
- II.5 Introduction des perturbations expérimentales.
 - II.5.1 Inclinaison de la fente.
 - II.5.2 Séparation des dioptries.

III IMPLANTATION SUR MICRO-ORDINATEUR ET RESULTATS.

III.1 Implantation.

III.1.1 Présentation.

III.1.2 Organisation du programme.

III.1.3 Analyse des fonctions implantées.

III.2 Résultats.

III.2.1 Etude des paramètres propres à la simulation.

III.2.2 Etude des paramètres du système.

IV CONCEPTION ET REALISATION DU SYSTEME.

IV.1 Caractéristiques géométriques.

IV.2 Optimisation du temps d'acquisition.

IV.3 Traitement des acquisitions.

IV.3.1 Organisation.

IV.3.2 Calcul des puissances.

IV.3.3 Filtrage.

IV.3.4 Détermination de l'astigmatisme.

IV.4 Résultats.

CONCLUSION

- BIBLIOGRAPHIE.

- ANNEXE 1. Les réfractomètres objectifs.

- ANNEXE 2. Dérivation par segmentation successive.

- ANNEXE 3. Interpolation par un polynôme
trigonométrique du premier degré.

- ANNEXE 4. Programmes de simulation.

- ANNEXE 5. Programmes d'acquisition et de traitements.

- ANNEXE 6. Carte d'acquisition analogique-numérique.

INTRODUCTION

Le but de notre travail, proposé par le service d'exploration fonctionnelle de la vision du C.H.R. de Lille en collaboration avec le Laboratoire d'Automatique de Lille I, consistait en la réalisation d'un appareil automatisé de mesure de l'état de réfraction de l'oeil.

Cet appareil devait répondre aux exigences suivantes :

- Déterminer les amétropies sphériques ou non sphériques (astigmatisme).
- Utiliser une méthode objective ne nécessitant pas la collaboration du sujet.
- Acquérir toutes les données suffisantes au calcul des lentilles correctrices éventuelles en un temps inférieur à la seconde.
- Etre portable pour permettre l'examen dans les meilleures conditions de confort du patient.
- Avoir une précision inférieure au quart de dioptrie. Cette précision est couramment acceptée en clinique.

Depuis quelques années, plusieurs réfractomètres automatiques ont été proposés aux ophtalmologistes (Annexe I), mais aucun ne répond à toutes ces conditions. En particulier ils ne sont pas portables, et sont très peu adaptés à l'examen réfractométrique d'un très jeune

enfant couché ou tenu dans les bras d'un adulte.

Dans le chapitre I, nous exposerons le principe optique et la description détaillée de la réalisation expérimentale du dispositif réfractométrique que nous avons développée au Laboratoire de Biophysique.

Afin d'optimiser les caractéristiques de l'appareil (efficacité, coût, précision, extension en frontofo-comètre), nous avons étudié, à l'aide d'une simulation sur un micro - ordinateur, l'influence des différents paramètres géométriques et physiologiques du système réfractomètre - patient. Cette étude a été effectuée en deux parties: analyse mathématique (chapitre II) et mise en oeuvre sur calculateur (chapitre III).

Nous en avons déduit les caractéristiques géométriques optimales et abouti à la conception d'un appareil fournissant automatiquement toutes les valeurs requises pour la correction d'un oeil ou caractérisant une lentille (chapitre IV).

C H A P I T R E - I

P R E S E N T A T I O N D U P R O J E T

Les réfractomètres sont des appareils destinés à la mesure objective de l'état de la réfraction de l'oeil. Ils sont basés sur le principe de l'ophtalmoscopie indirecte.

Il s'agit tout d'abord de projeter l'image d'un test sur la rétine du sujet, cette image joue ensuite le rôle d'objet lumineux pour l'observateur. Il est ensuite possible de comparer le test et son image.

Nous décrirons dans une première partie la méthode simple et rapide de mesure de la réfraction de l'oeil proposée par SERVANT M. (réf. 1), méthode qui a été déterminante pour notre travail.

Nous terminerons ce chapitre par la description d'une réalisation expérimentale permettant d'étendre les possibilités du dispositif.

I.1 ETUDE D'UN REFRACTOMETRE AUTOMATIQUE.

Une source de lumière envoie, par l'intermédiaire d'un miroir incliné centré sur un trou noir T, un large faisceau entrant dans l'oeil (fig. 1.1).

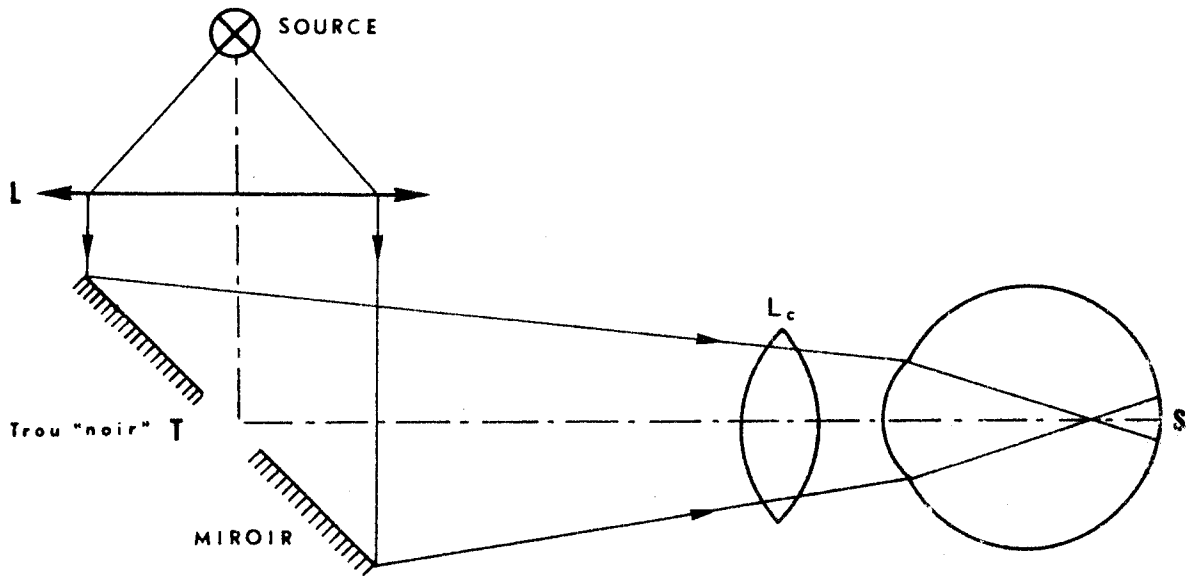


FIGURE 1.1

La tache lumineuse S qui apparaît sur la rétine est formée par des rayons légèrement excentrés par rapport à l'axe du système. Aucun rayon ne provient du trou noir, ce trou T peut être considéré comme source extérieure "noire". La trajectoire des rayons ("rayons noirs") est représentée figure 1.2.

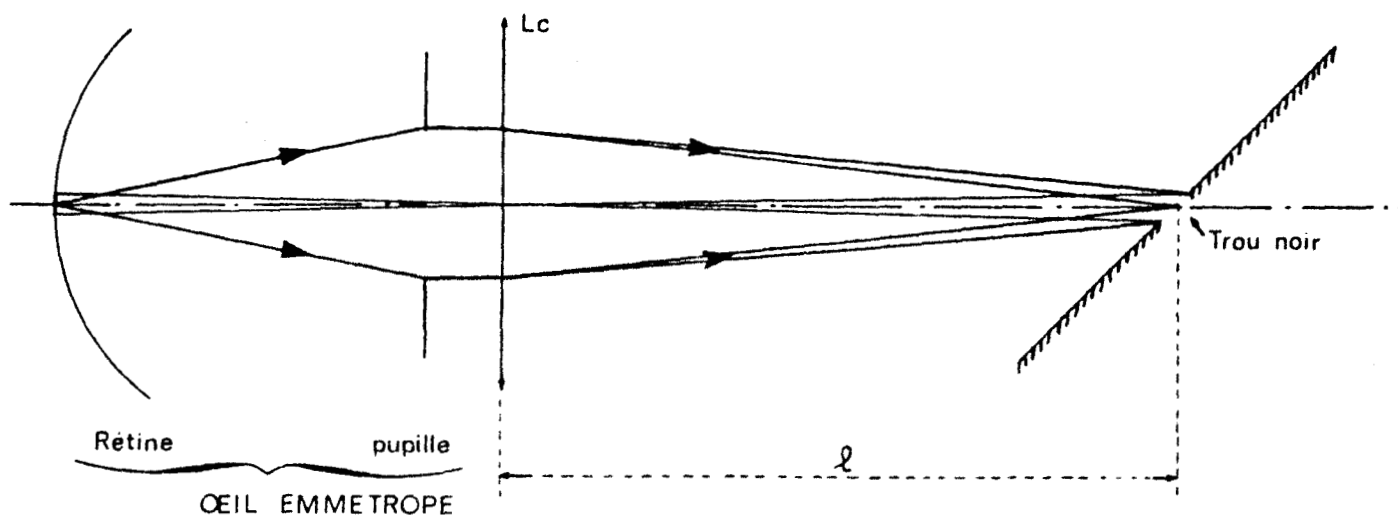


FIGURE 1.2

Pour une lentille L_c convenablement choisie, placée devant l'oeil, le trou noir et la rétine sont conjugués. L'image du trou T se forme en t' sur la rétine, et inversement l'image de t' est confondue avec le trou noir. Aucun rayon lumineux entrant dans l'oeil ne vient de T , de même aucun rayon sortant de l'oeil ne revient sur le trou où l'éclairement est nul.

Si le système est légèrement défocalisé, une partie de la lumière issue de la couronne entourant T vient l'éclairer. Dans ces conditions, un phototransistor placé derrière le trou T mesurera une certaine quantité de lumière.

La meilleure focalisation du système est recherchée en plaçant successivement devant l'oeil une série de lentilles de puissances variables.

Quand le signal de sortie du phototransistor est

minimum, le remotum est dans le plan du trou noir. On en déduit l'amétropie par la différence

$$R = V - \frac{1}{l}$$

où V est la vergence de la lentille d'essai correspondante et l la distance séparant l'écran du sommet cornéen.

Ce calcul est effectué directement par un micro - ordinateur couplé au phototransistor par une carte d'acquisition numérique - analogique.

1.2 AMELIORATIONS ET SOLUTIONS PROPOSEES.

1.2.1 Mesure de l'astigmatisme.

Dans la pratique, l'appareil décrit ci-dessus, donne satisfaction en fournissant automatiquement des indications concernant la myopie et l'hypermétropie, c'est - à - dire dans le domaine des amétropies sphériques.

La correction de l'amétropie sphérique permettra d'obtenir une image se projetant sur la rétine. L'obtention d'une vision nette suppose de plus, que dans les conditions de l'approximation de GAUSS, l'image d'un point lumineux soit ponctuelle sur la rétine.

Si la puissance de l'oeil n'est pas constante dans toutes les directions (oeil astigmaté), la condition précédente n'est pas réalisée et une correction supplémentaire devra être apportée.

Pour étendre les possibilités de l'appareil à la mesure de l'astigmatisme, nous avons proposé une modification dans la structure géométrique de la source lumineuse, supprimant la symétrie de révolution.

Cette dissymétrie est réalisée en formant sur la rétine, par l'intermédiaire des lentilles L et L_v , l'image d'une source étendue entourant une fente rectangulaire noire (fig. 1.3).

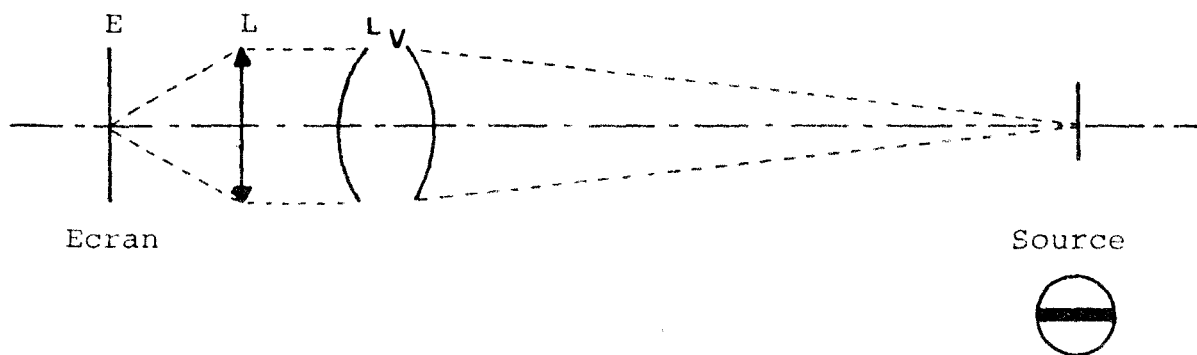


FIGURE 1.3

La modification apportée ne change pas le principe optique, et l'éclairement d'un photocapteur placé au centre de la fente noire sera minimum si les plans de la source et de la rétine sont conjugués pour une direction donnée.

Pour déterminer l'astigmatisme, il nous suffit de faire tourner la fente noire dans son plan et de mesurer, pour chacune de ses positions, la puissance de l'oeil correspondante.

1.2.2 Rapidité et précision des mesures.

Lors des essais effectués avec le précédent dispositif, les temps d'acquisition étaient de l'ordre de 0,5 seconde avec une précision de 0,5 dioptrie pour une mesure globale de la réfraction de l'oeil.

Notre cahier des charges nous impose des contraintes nettement plus sévères :

- Moins de 0,5 secondes de temps d'acquisition pour une étude complète de l'oeil.

- Précision de 0,25 dioptrie sur les puissances sphériques.

- Précision de 5 degrés sur les axes principaux de l'astigmatisme.

- Fiabilité des mesures fournies par le système.

Cette procédure suppose l'acquisition d'environ 1200 mesures et l'analyse de 50 courbes. Ces contraintes sont nettement majorées par rapport au refractomètre étudié par SERVANT M. (réf. 1) où l'analyse d'une seule courbe était nécessaire.

Celà c'est traduit en pratique par :

- La réalisation d'un montage expérimentale de manière à introduire la fente sombre dans le trajet des rayons lumineux et y associer un dispositif mécanique permettant sa mise en rotation par un moteur pas - à - pas.

- Le développement d'une simulation numérique du système optique (Chapitres II et III), pour en définir l'optimum géométrique (taille et forme de la source lumineuse, taille de la fente noire, rôle de la pupille, ...), et en déduire une méthodologie de traitement de l'information (Chapitre IV).

- L'évaluation des erreurs systématiques liées à la réalisation matérielle (non linéarité due aux contraintes de distance à respecter entre les dioptries) et aléatoires occasionnées par la variation de distance entre les lentilles d'essai et le cristallin, pour en déduire l'incertitude sur les mesures effectuées (Chapitre III).

- L'optimisation des vitesses de rotation des éléments mobiles (lentilles d'essais et fente noire) et l'élaboration d'une nouvelle méthode d'acquisition (Chapitre IV).

- La mise au point d'un programme performant, aisément implantable sur micro - processeur, fournissant au praticien toutes les valeurs requises pour la détermination de lentilles correctives (Chapitre IV).

I.3 REALISATION EXPERIMENTALE.

La figure 1.5 représente schématiquement un mode de réalisation du dispositif de mesure de la réfraction selon le principe optique décrit précédemment.

Nous nous sommes servis de cette structure pour toute la partie expérimentale de notre étude.

La source de lumière (1) focalisée par une lentille (2) converge vers la rétine de l'oeil examine pour y former une image lumineuse (4). Cette image comporte notamment une zone noire correspondant à la "fente optique noire" précédemment décrite.

Un disque rotatif (6) porte 23 lentilles d'essais échelonnées de -11 à 11 dioptries par pas de une dioptrie (fig. 1.4).

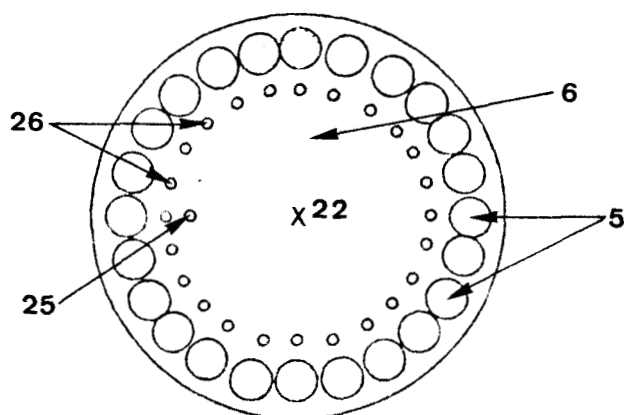


FIGURE 1.4

Les centres optiques des lentilles sont placés de manière équidistante sur un cercle dont le centre (22) constitue le centre de rotation du disque. Ce disque est entraîné par un moteur à courant continu de manière à interposer successivement les lentilles d'essais (5) entre l'oeil et l'ensemble source - lentille de focalisation.

Le disque (6) est pourvu d'un trou unique de synchronisation (25). Sur un cercle concentrique, le disque comporte des trous de repérage (26) en nombre égal à celui

des lentilles d'essai, chaque trou correspondant à une lentille déterminée. L'agencement est tel que lorsque l'une des lentilles est interposée correctement entre l'oeil et la lentille de focalisation, le trou de repérage correspondant soit placé entre une photodiode (9b) et un phototransistor (10b) montés face à face sur un cavalier fixe (27), de part et d'autre du disque (6). Ce cavalier porte un autre couple photodiode (9a), phototransistor (10a) disposés face à face, destiné au repérage du trou de synchronisation (25) à chaque révolution du disque (6). Cet ensemble de photodiodes et de phototransistors est relié à un micro-calculateur Apple II (8) qui identifie chaque lentille d'essai (5) lors de son interposition entre l'oeil (3), et l'ensemble source (1), lentille de focalisation (2).

Un plan opaque (12) incliné de 45° par rapport à l'axe optique (17) est interposé entre les lentilles d'essai et l'ensemble source - lentille de focalisation. Un moteur pas - à - pas, commandé par le micro-calculateur, permet la mise en rotation du plan autour d'un axe (24) interceptant l'axe optique (17).

Ce plan, opaque dans le sens source lumineuse - oeil, est un miroir rectangulaire qui réfléchit la lumière renvoyée par la rétine (fig 1.6). Les rayons lumineux émis par l'image (4) formée sur la rétine convergent vers un phototransistor (7) relié au micro-calculateur par une carte d'acquisition analogique numérique (Annexe VI).

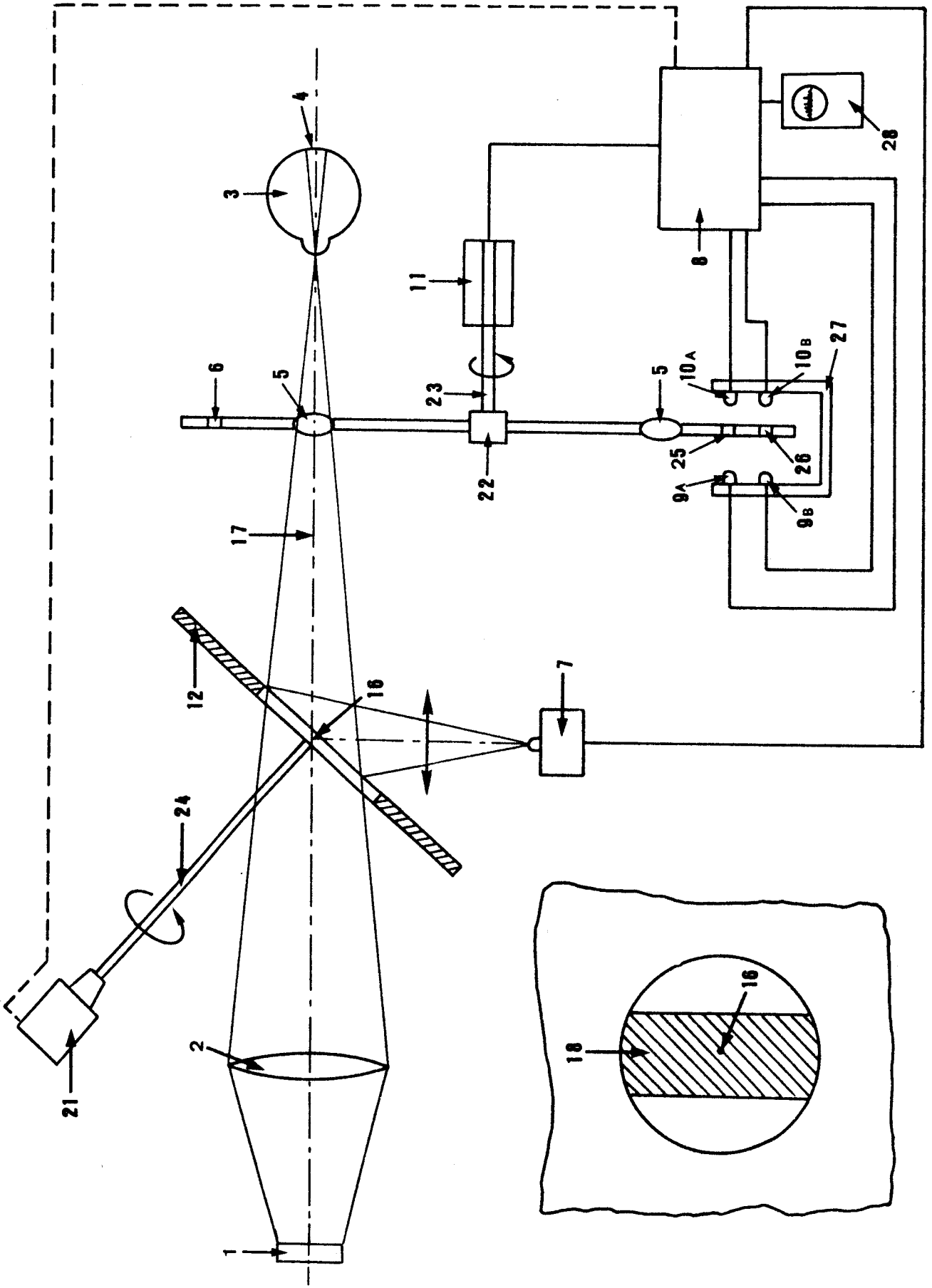


FIGURE 1.5

FIGURE 1.6

Pour faciliter l'observation des signaux électriques produits par le photocapteur, un oscilloscope (28), placé en série avec la carte d'acquisition, visualise la forme des signaux en temps réel. Ci-dessous est représenté un exemple de courbe obtenue lorsque, pour une position angulaire donnée de l'écran par rapport à son centre (16), l'interposition d'une lentille d'essai de +2 dioptries entraîne un signal de luminosité minimum du détecteur (fig. 1.7).

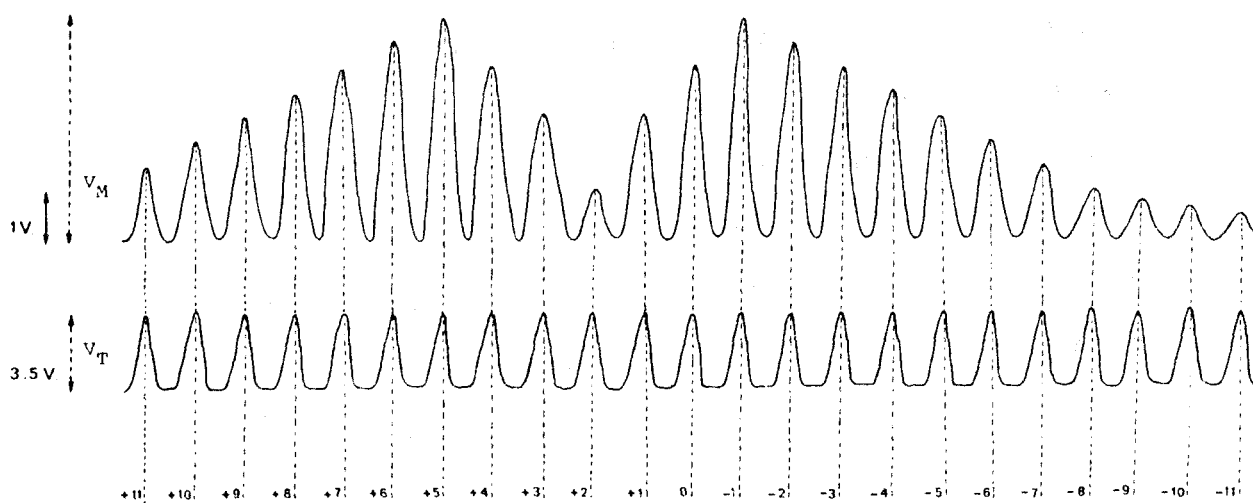


FIGURE 1.7

Pour mesurer la puissance de l'oeil dans toutes les directions, on fait tourner pas-à-pas l'écran (12) autour du centre (16), ce qui permet, en présence d'un astigmatisme, d'observer un décalage du minimum en relation avec les variations de puissance. L'étude de ces variations par le micro - ordinateur permet de déterminer les défauts de la réfraction de l'oeil et fournir au praticien, sous forme convenable, les valeurs dont il a besoin pour déterminer les caractéristiques de la lentille corrective requise.

Etude expérimentale.

Pour toute l'étude que nous avons effectuée, nous nous sommes servis en remplacement de l'oeil :

a) d'un oeil fantôme TOPCON, constitué d'une lentille convergente de 45 dioptries, fixée sur une boîte cylindrique. Le fond peut se déplacer autour d'une position moyenne correspondant à l'oeil émmétrope. Les déplacements sont directement gradués en degré d'amétropie. D'autre part, sur la face interne mobile, une image du fond de l'oeil est peinte, afin de donner à l'oeil fantôme des caractéristiques d'absorption et de réflectance de la lumière semblables à celles de l'oeil humain.

b) d'un système optique fixe, composé d'une lentille de focalisation, d'un écran et d'un support adapté à recevoir une lentille dont on veut mesurer la puissance, ces trois éléments étant disposés suivant l'axe optique du dispositif.

Ces deux modes de réalisation nous ont permis de mener parallèlement à l'étude du principe optique, la conception d'un réfractomètre (analyse d'un oeil) et d'un frontofocomètre (analyse d'une lentille) automatiques.

C H A P I T R E - I I

SIMULATION DU SYSTEME

L'application du principe optique exposé au chapitre précédent est très simple : rechercher la lentille d'essai provoquant le minimum d'éclairement.

Avec la précision désirée (0,25 dioptrie) et une gamme de mesure de -15 à +15 dioptries, le nombre de lentilles situées sur le disque optique devrait être de 120, difficilement réalisable en pratique pour le système envisagé.

Nous devons donc optimiser les caractéristiques et les dimensions de chaque constituant de l'appareil, de manière à en diminuer la taille.

La simulation sur ordinateur numérique est une méthode souple permettant d'atteindre ce but.

Dans ce chapitre, nous détaillerons les simplifications du schéma optique et sa mise en équations, afin de faciliter l'implantation de la simulation sur micro - ordinateur.

II.1 CHOIX DE LA METHODE

Deux principales méthodes d'analyse du système optique sont possibles :

a) expérimentalement, par essais successifs sur banc optique.

Ce qui représente l'approche la plus complète, car nous tenons alors compte de toutes les lois régissant le système. Par contre, nous devons, à chaque essai, construire ou modifier un élément du système, ce qui est long, fastidieux et coûteux.

b) par simulation sur ordinateur numérique d'un modèle de connaissance.

Il s'agit d'une méthode beaucoup plus souple, car elle permet de modifier rapidement chaque paramètre indépendamment des autres, uniquement en faisant varier sa valeur numérique. Par contre, cette méthode impose la description précise des lois physiques régissant le système.

Nous avons choisi la seconde méthode en raison des plus grandes possibilités d'étude des différents paramètres. De plus, l'utilisation du modèle de connaissance permet une meilleure compréhension des mécanismes internes de fonctionnement, tout en facilitant une recherche plus rapide de l'optimum de chaque élément constituant l'instrument complet.

Pour que cette méthode soit exploitable, nous serons amenés à effectuer de multiples simplifications afin de rendre la simulation simple et performante, compatible avec une implantation sur micro-ordinateur.

Le principe optique expose précédemment, malgré son apparente

simplicité, pose de délicats problèmes de mise en équations. En effet, pour obtenir un modèle de connaissance suffisamment précis, en fonctions de nombreux paramètres, nous sommes conduits à introduire les notions de sources étendues et de flous, afin de tenir compte des surfaces réelles de la source, de la fente noire et du détecteur. Une simple étude sur une source lumineuse ponctuelle étant insuffisante pour rendre compte des variations d'intensité lumineuse mesurées expérimentalement.

II.2 SIMPLIFICATIONS APPORTEES

II.2.1 SIMPLIFICATIONS DU SCHEMA OPTIQUE.

Une grande analogie entre la simulation d'un frontofocomètre ou celle d'un réfractomètre automatique est possible en assimilant l'ensemble des dioptries de l'oeil à celui d'un dioptre sphérique unique.

L'oeil peut être modélisé de façon très simple en considérant trois éléments (fig. 2.1) :

- un diaphragme (l'iris).
- un dioptre unique : une lentille convergente (corne et cristallin).
- un écran (la rétine).

En négligeant la courbure de la rétine, en admettant l'approximation du dioptre unique et la distance L-E étant fixée, mais non nécessairement égale à celle d'un oeil moyen, l'analogie entre l'oeil et un système diaphragme - lentille est parfaitement acceptable.

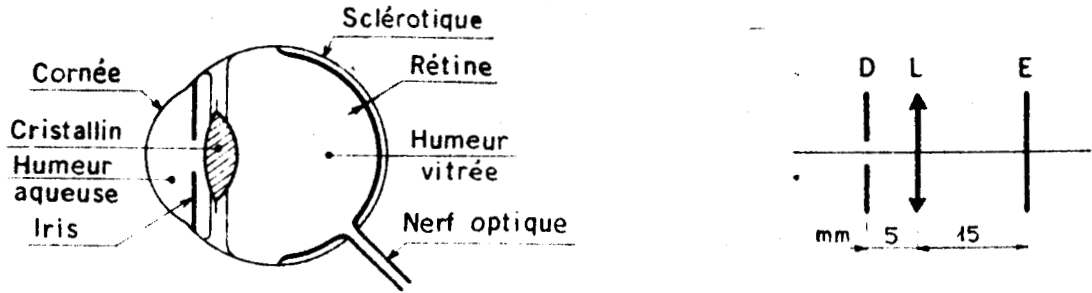


FIGURE 2.1

Qu'il s'agisse d'un frontofocomètre ou d'un réfractomètre, le schéma optique se ramène à trois parties distinctes (fig. 2.2) :

- un plan comprenant la source lumineuse, la fente noire et le détecteur.
- le bloc optique (ensemble des lentilles).
- un écran.

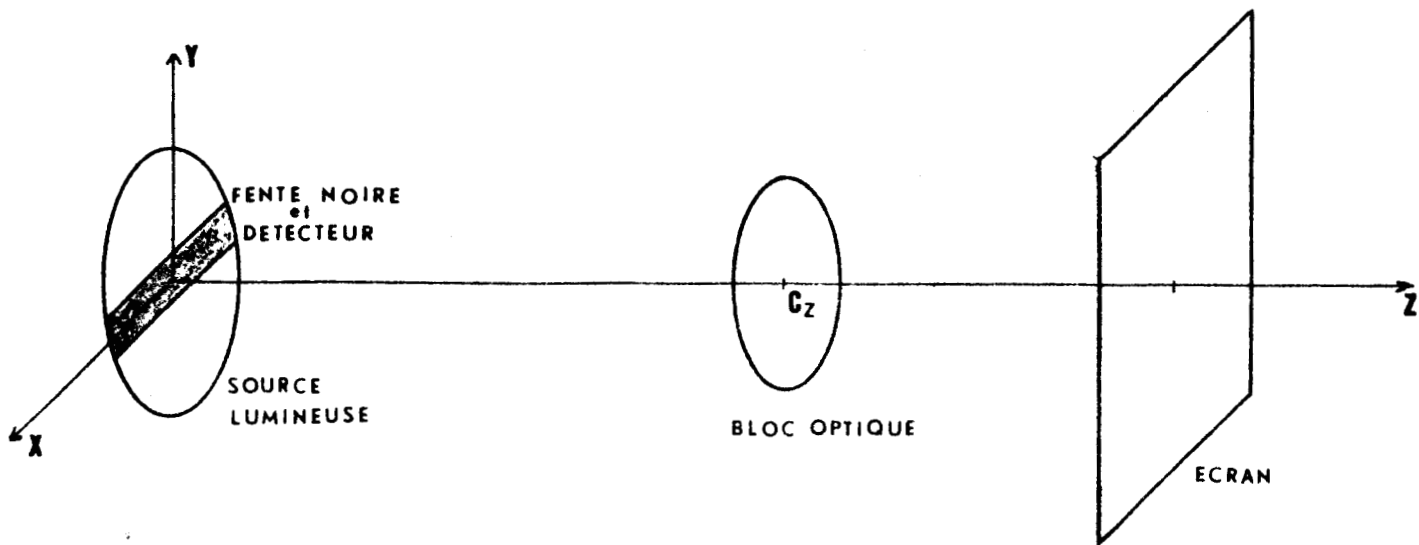


FIGURE 2.2

1. L'ensemble source - détecteur.

Nous pouvons ramener l'ensemble source - détecteur dans le même plan en considérant :

- que la source lumineuse correspond à la zone entourant la fente noire.
- que le détecteur recevant la lumière réfléchie est placé au centre de la fente noire, et ne capte le flux lumineux que sur une surface au maximum égale à la fente noire.

2. Le bloc optique.

Cet ensemble est composé :

- des lentilles d'essai.
- d'une lentille de puissance inconnue (lentille à mesurer du frontofocomètre ou dioptre oculaire du réfractomètre).

Nous pouvons considérer l'ensemble comme une seule lentille. En effet, en admettant que les différents dioptres possèdent tous le même axe, la formule des associations de lentilles est applicable.

Soit une lentille d'essai appartenant au disque optique, de distance focale F_i et de centre O' , suivie de la lentille inconnue de focale F_v et de centre O'' . En prenant F_i et F_v en valeur algébrique et en appelant e la distance $o'o''$, le système équivaut à une lentille unique de distance focale F , donnée par

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_i} + \frac{1}{F_v} - \frac{e}{F_i * F_v}$$

Nous considérons de plus que cet ensemble ne possède qu'une seule pupille, située dans le plan de la lentille, égale à la pupille qui sera vue sous le plus petit angle du plan image et du plan objet.

3. L'écran.

Dans notre modèle optique, ce plan est considéré comme un simple diffuseur satisfaisant à la loi de Lambert, d'albedo égale à 1, et d'aire non limitée (par rapport à la taille des images formées sur sa surface).

Nous utiliserons les notations :

Ez : distance de la source à l'écran.

Cz : distance de la source au centre de la lentille unique.

F : focale équivalente.

P : pupille équivalente.

II.2.2 SIMPLIFICATIONS DU CALCUL DE L'ECLAIREMENT.

Le problème est apparemment simple : calculer l'éclairement reçu par le photocapteur lors du retour inverse de la lumière. Dans le modèle optique simplifié défini ci-dessus, il s'agit de déterminer l'éclairement du détecteur placé au centre de la fente noire.

Pour obtenir l'éclairement du photocapteur, nous devons additionner dans son plan (plan image) les éclairagements produits par les divers éléments de la zone éclairée de la source (plan objet). Ceci n'est possible

que si les divers éléments de la source émettent des vibrations incohérentes entre elles (aucune liaison permanente de phase). La source utilisée étant formée d'une simple lampe, il y a une cohérence partielle que nous avons rapprochée de l'incohérence parfaite en considérant que la source est suffisamment étendue (MARECHAL réf. 6).

Si le système est focalisé, dans le sens source - écran, la lentille forme l'image en A' d'un point A située dans le plan XOY , sur le plan $X'O'Y'$ (fig. 2.3). Par retour inverse, dans le sens écran - source, l'image du point H sera le point A' .

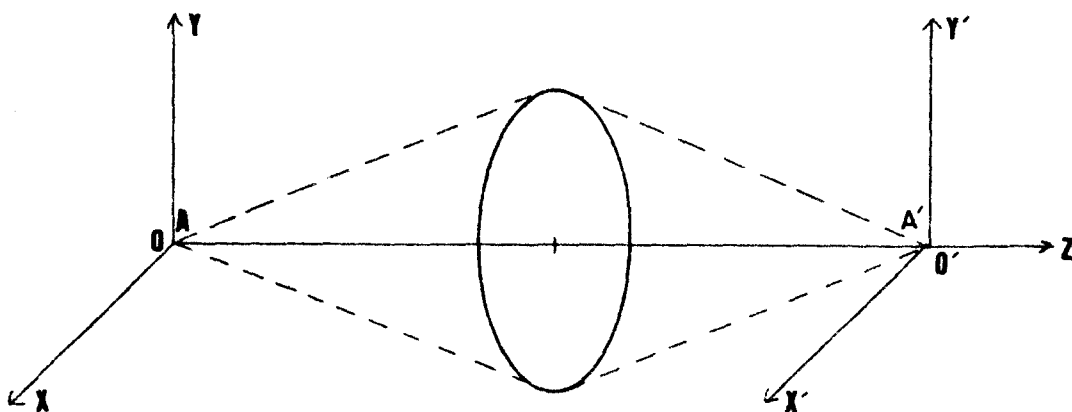


FIGURE 2.3

Appelons (x,y) , (x',y') les coordonnées du point objet A et de son image paraxiale A' .

Si le système est défocalisé, l'image effective du point objet $A(x,y)$ n'est pas réduite au point $A'(x',y')$, mais s'étale autour de ce point. En plaçant ce point objet à l'origine, on obtient dans le plan image une répartition d'éclairement que l'on peut représenter par une fonction de répartition $D(x',y')$. Cette fonction ne tient compte, dans notre cas, que de la défocalisation car on admet que les aberrations du

système optique sont négligeables.

L'image du point A de coordonnées (x,y) sera représentée par la fonction $D(x'-gx, y'-gy)$ si g est le grandissement linéaire transversal du système optique.

En représentant par la fonction $O(x,y)$ la répartition des luminances dans la source, la répartition des éclairements $I(x',y')$ dans l'image sera obtenue en faisant la somme des éclairements produits par les images des divers points de l'objet.

Nous pouvons donc exprimer cette répartition par le produit de convolution :

$$I(x',y') = \iint_{Ob_j} O(x,y) D(x'-gx, y'-gy) dx dy ,$$

avec intégration sur toute l'étendue de l'objet.

Simplifications.

Après cette présentation globale de la méthode utilisée, nous devons préciser quel va en être le mode de calcul.

En effet, le nombre de paramètres à étudier étant important, nous ne pouvons pas réaliser la mise en équation du système dans sa totalité.

De manière à faciliter l'implantation de la simulation sur un micro-ordinateur, une approche particulière du calcul de l'éclairement s'est avérée nécessaire.

Calcul de l'éclairement produit par l'image d'un point éclairé de l'objet (source) sur l'écran :

Si le système est focalisé, l'image d'un point de la source forme un point sur l'écran.

Par contre, si il est défocalisé, l'image de ce point sera une

tache (fig. 2.4).

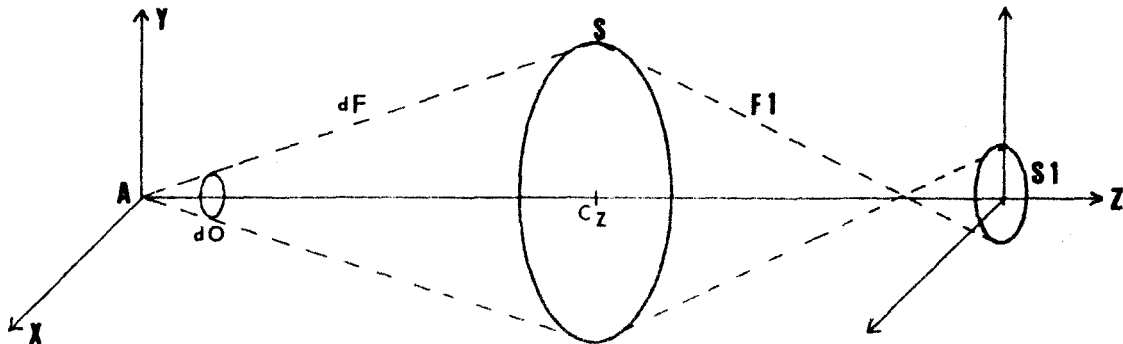


FIGURE 2.4

Soit A une source ponctuelle, c'est-à-dire de dimensions petites par rapport à la distance Cz séparant la lentille de la source. Nous pouvons admettre que l'intensité lumineuse I ne varie pas en fonction de la direction (source isotrope).

Le faisceau issu du point A, éclairant la surface S de la lentille est limité par le cône de sommet A s'appuyant sur le contour de S .

Le flux lumineux dF du faisceau est proportionnel à son angle solide dO sous lequel on voit la pupille à partir de A. Nous avons donc $dF = I \cdot dO$, avec dO constant pour Cz et S fixes.

Le flux dF émis par le point A et pénétrant dans la lentille est aussi une constante si l'intensité I est constante.

Le flux $F1$ qui ressort de la lentille est alors $F1 = t \cdot dF$ en notant t le facteur de transmission de la lentille.

L'éclairement de l'écran, au niveau de l'image, sera égal à $E1 = F1/S1$, $S1$ étant la surface de la tache dans le cas du système défocalisé.

Si nous considérons le facteur de transmission t égal à 1 (milieu parfaitement transparent), pour un flux unitaire, nous en déduisons que

l'éclairement au niveau de la tache reçu par l'écran est inversement proportionnel à la surface de la tache, et est constant sur toute cette surface.

$$E_1 = 1/S_1.$$

Cette remarque simplifie fortement le calcul général de l'éclairement car il suffit de calculer la forme et la taille de la tache d'après les principes de l'optique géométrique pour obtenir sa surface, donc son éclairement.

II.3 ETUDE DU FAISCEAU LUMINEUX.

Seuls nous intéressent les rayons des taches lumineuses formées par l'image d'un point de la source lorsque le système est défocalisé. La mise en équation du modèle est établie suivant les principes de l'optique géométrique en faisant abstraction des aberrations expérimentalement faibles.

La représentation graphique du système est établie en considérant que l'image d'un point de la source est située en avant du plan du détecteur, ce qui ne nuit pas à la généralité des résultats obtenus.

Pour la clarté des schémas, les angles sont considérablement augmentés, mais nous travaillons dans les conditions paraxiales de Gauss.

II.3.1 DANS LE SENS SOURCE - ECRAN.

Appelons (J_y, J_z) les coordonnées du point J et $(H_y, H_z=0)$ celles de H, f la distance focale du bloc optique, C_z et E_z respectivement les distances séparant le bloc optique et l'écran de la source (fig. 2.5).

D'après la formule de DESCARTES (origine au centre de la lentille), nous avons,

$$\frac{1}{C_z} + \frac{1}{J_z - C_z} = \frac{1}{f}$$

d'où l'on en déduit

$$J_z = \frac{C_z^2}{C_z - f} \quad \text{et} \quad J_y = \frac{-f_x H_y}{C_z - f}$$

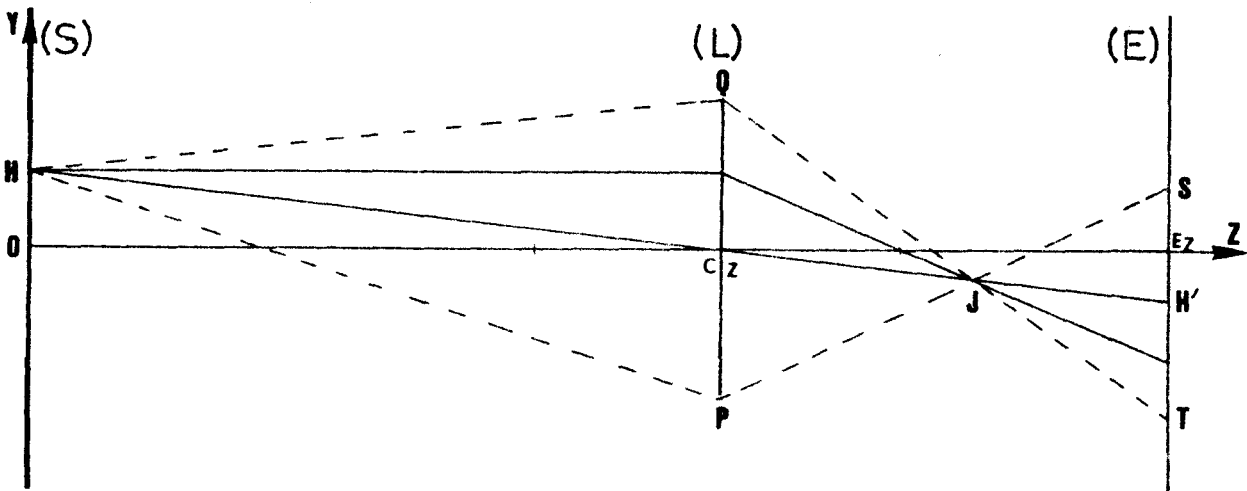


FIGURE 2.5

Rayon et centre de la tache.

Le faisceau lumineux traversant la lentille est limité par les deux

droites (QT) et (PS) passant par le point J.

Si nous appelons $p/2$ le rayon du diaphragme et R_p' le rayon de la tache formée sur l'écran, nous obtenons :

$$R_p' = \frac{p}{2} * \frac{Cz^2 - Ez * Cz + f * Ez}{f * (Ez - Cz)} \quad (3.1)$$

Les propriétés de l'homothétie conduisent immédiatement au calcul du centre (H') de coordonnées ($H'y, Ez$) de la tache :

$$H'y = Hy * \frac{Cz - Ez}{Cz}$$

II.3.2 DANS LE SENS ECRAN - SOURCE.

Considérons la source secondaire (H'), de surface infiniment petite, élément du plan de l'écran (fig. 2.6).

Avec les restrictions imposées précédemment, nous pouvons assimiler ce point à une source lumineuse secondaire émettant dans un faisceau contenu dans le cône de sommet (H') et s'appuyant sur le contour de la pupille.

Le calcul de R_p , rayon de la tache lumineuse formée sur le plan de la source et issue du point H' est immédiat en appliquant la formule du grandissement transversal à R_p' calculé précédemment :

$$R_p = \frac{Cz - Ez}{Cz} * R_p' \quad (3.2)$$

la tache étant centrée sur le point (H), de coordonnées ($H_y, 0$).

A la source secondaire A' , limite de la tache T' , correspond une tache lumineuse centrée par A , de rayon R_p . On en déduit R_t , rayon total de la tache formée sur le plan de la source :

$$R_t = 2 * R_p \quad (3.3)$$

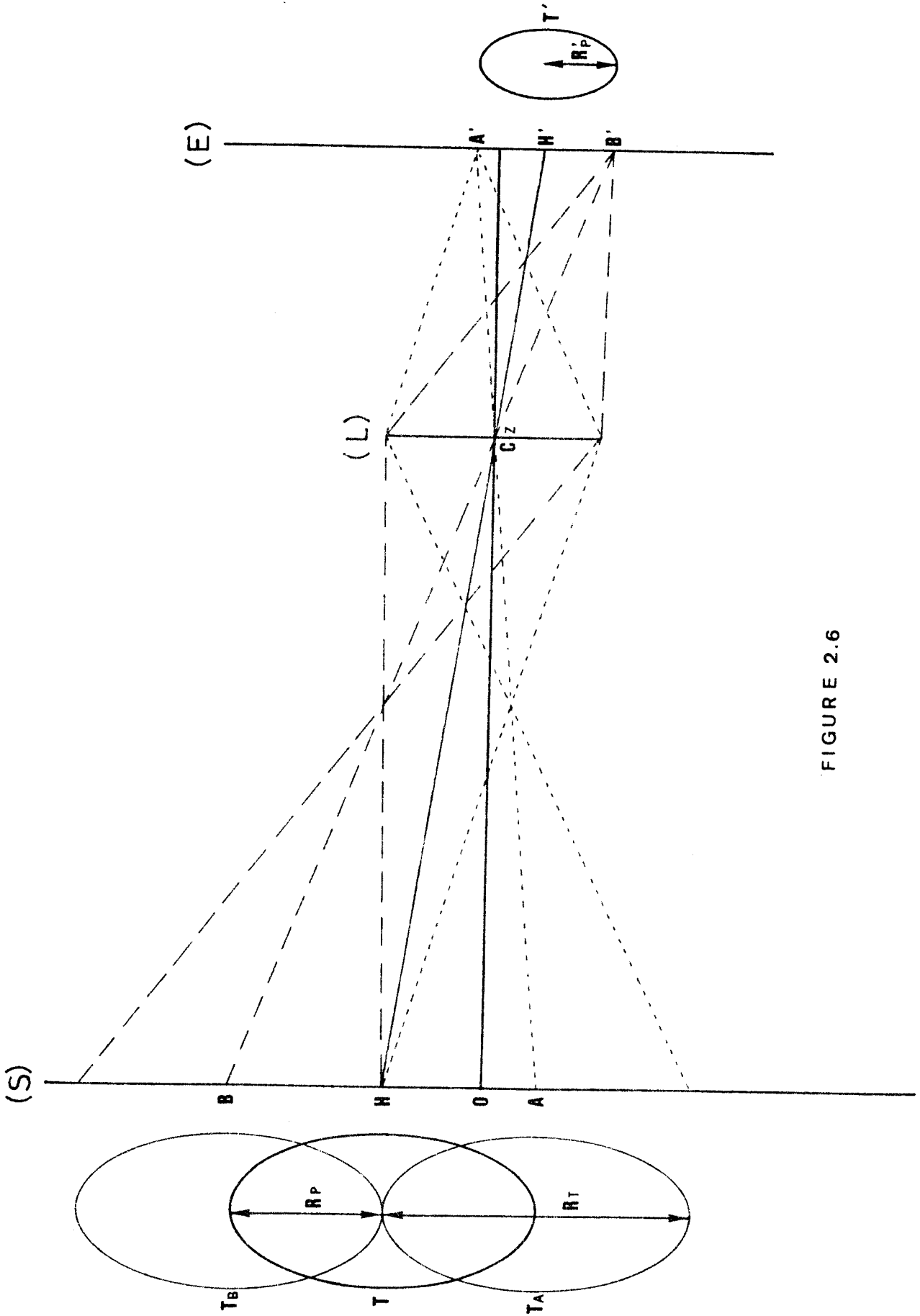


FIGURE 2.6

II.4 MODELISATION DE L'ECLAIREMENT.

La détermination de la quantité de lumière reçue par une surface peut être aisément calculée en utilisant les restrictions exposées au paragraphe II.2. Nous allons appliquer cette méthode au calcul de la répartition lumineuse au niveau de la source, après retour inverse de la lumière.

Pour une source élémentaire centrée sur H, de surface ds , l'éclairement E_a en chaque point de la tâche lumineuse produite sur l'écran est proportionnel à ds / dS , en appelant dS la surface de la tâche image.

En considérant l'élément différentiel constant, l'éclairement est inversement proportionnel à dS .

Par contre, pour la tâche lumineuse formée après retour sur le plan source-détecteur, cette simplification n'est plus possible : l'image d'une surface étendue ne donne plus une tâche uniforme, la répartition des flux lumineux n'est plus homogène.

La répartition des éclaircissements dans l'image formée sur le plan de la source sera obtenue en faisant la somme des éclaircissements produits par les images des points de la source secondaire située sur le plan de l'écran.

Deux cas limites sont envisagés :

a) une répartition uniforme, simplifiant le problème à l'extrême.

b) une répartition de type convolutive, théoriquement plus adaptée.

La première permet une grande facilité dans la compréhension des mécanismes participant à la création de l'image d'une source lumineuse de forme quelconque, la seconde plus proche de la réalité, mais de mise en oeuvre plus complexe.

Nous comparerons, lors de la mise en application de la simulation, la validité d'un modèle de distribution par rapport à l'autre, en confrontant le modèle théorique avec les résultats expérimentaux obtenus sur banc optique.

Forme de la tache étudiée.

Précédemment ont été déterminés les rayons des taches lumineuses images formées sur l'écran, puis après retour sur le plan du détecteur, pour des lentilles sphériques .

Dans le cas d'une lentille astigmatique, les taches ne sont plus circulaires. Si les deux focales sont situées à 90° l'une de l'autre (dioptrique torique), les taches sont elliptiques.

Il faut généraliser le problème en définissant les variables décrivant la lentille astigmatique et la tache lumineuse formée sur le plan de la source.

a) La lentille astigmatique (fig. 2.7).

- Sa forme est circulaire, de rayon utile $P/2$, égal à celui de la pupille du bloc optique.

- Ses focales sont F_v et F_w respectivement suivant les axes (Cz, V) et (Cz, W) , les vergences correspondantes étant V_v , V_w .

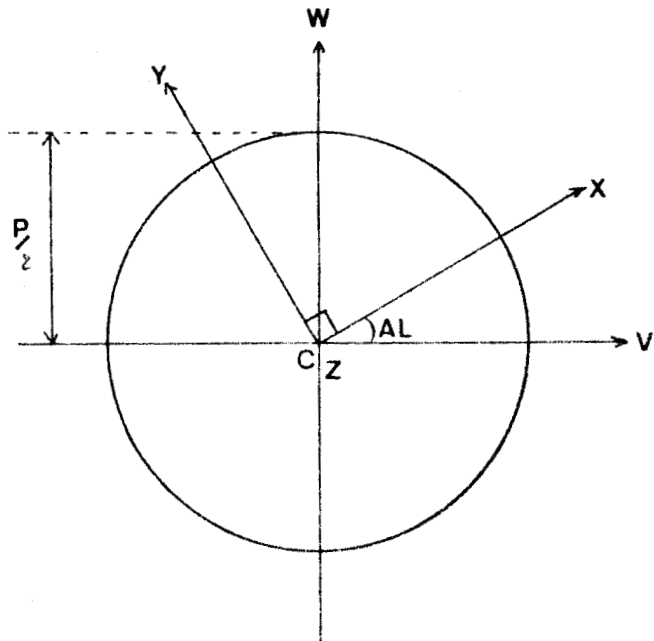
- Sa position axiale est donnée par l'angle A_1 mesuré par rapport au repère dans lequel se situe la source (X, Y) .

b) La tache (fig. 2.8) :

- Sa position est directement liée à la lentille astigmatique. Nous la considérons dans le même repère (V, W) que celui de la lentille, sa position angulaire étant repérée par l'angle de rotation A_1 .

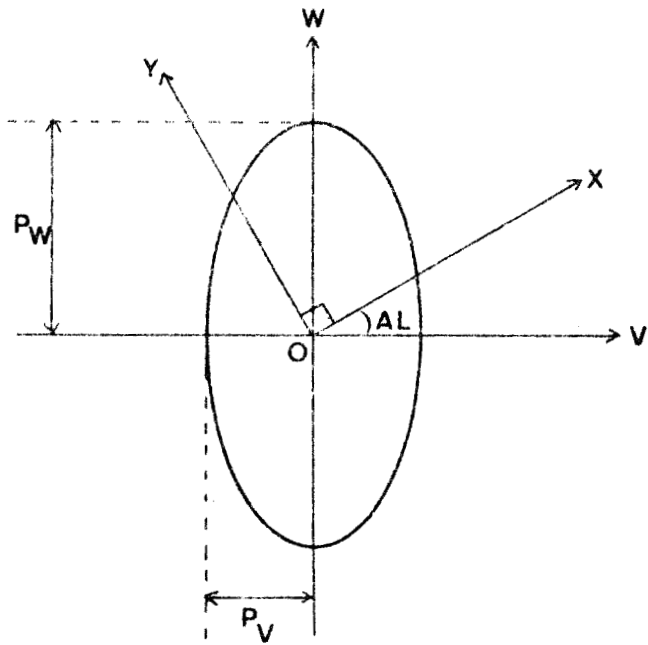
- Nous appellerons P_v et P_w ses dimensions suivant les axes principaux (O, V) et (O, W) .

Pour le calcul de P_v et de P_w , nous ne tiendrons pas compte pour l'instant de l'angle de rotation A_1 , que nous considérons comme nul, la tache étant ressituée dans le plan de coordonnées (VOW) , centrée sur le point O .



LENTILLE INCONNUE

FIGURE 2.7



TACHE LUMINEUSE

FIGURE 2.8



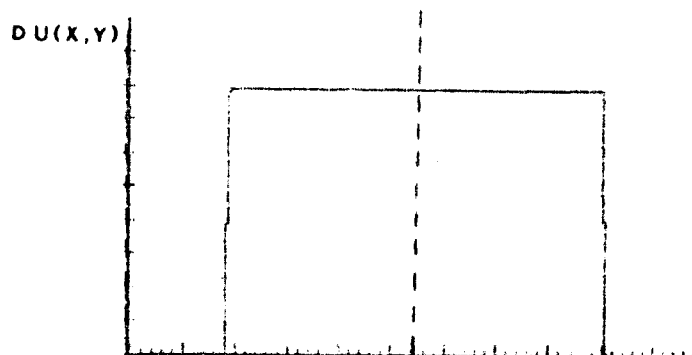
II.4.1 MODELE DE REPARTITION UNIFORME.

Les dimensions totales de la tache lumineuse issue du point (H) et éclairant le plan du détecteur après réflexion sur l'écran sont calculées suivant l'équation (3.3), ce qui conduit à une fonction de répartition :

$$D_u(X, Y) = \frac{1}{P_i * P_v * P_w},$$

et $D_u(X, Y) = 0$ partout ailleurs (fig. 2.9).

P_v et P_w sont les axes principaux de l'ellipse image, leurs dimensions variant avec les focales des lentilles utilisées.



REPARTITION LUMINEUSE
DE TYPE UNIFORME

FIGURE 2.9

II.4.2 MODELE DE REPARTITION DE TYPE CONVOLUTIVE.

- Dans le sens source-écran, à chaque point de la source correspond une tache elliptique T' d'éclairage uniforme et d'axes $P'v$ et $P'w$.

La valeur de l'éclairage sur l'écran pour cette source

élémentaire est

$$E'u = \frac{1}{P_i * P'v * P'w}$$

- Par contre, dans le sens écran - source, chaque point de la tache T' produit sur la source une autre tache lumineuse dont la répartition de l'éclairement ne sera plus constante.

Evaluons cette fonction de répartition :

L'éclairement de la tache possède une symétrie axiale par rapport à l'axe optique, nous pouvons donc ne pas tenir compte de l'inversion éventuelle de l'image résultant du domaine de variation du grandissement de la lentille.

Une surface élémentaire de l'écran, considérée comme source secondaire, produit sur le plan du détecteur un éclairement égal à :

$$E_u = \frac{1}{P_i * P'v * P'w} * \frac{1}{P_i * P_v * P_w} \quad (3.4)$$

Il est nul à l'extérieur de cette tache.

Un point quelconque H de la source primaire crée une tache T' sur l'écran qui, lors du retour, éclaire le plan source - détecteur (fig. 2.10).

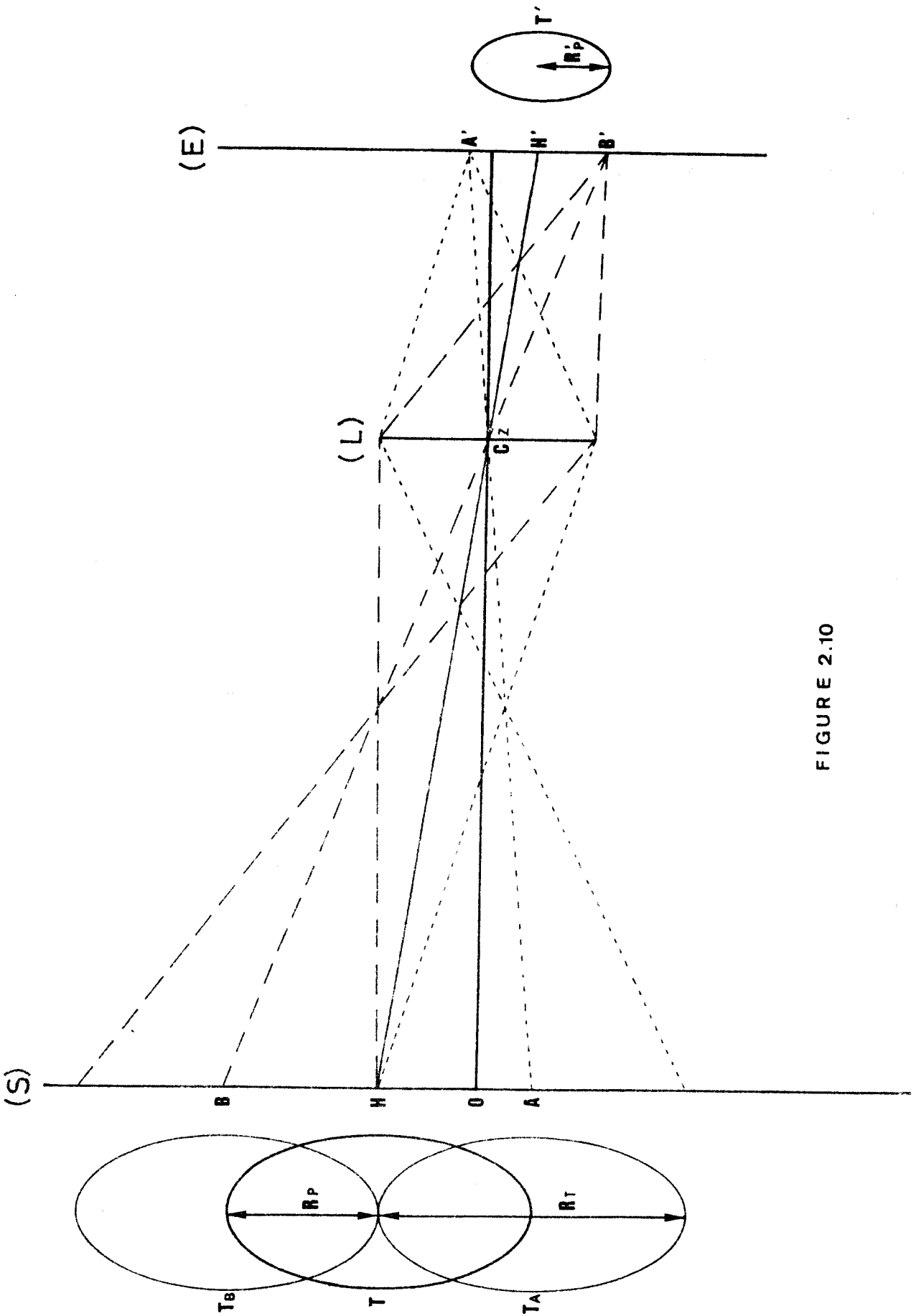


FIGURE 2.10

Chaque point de T' donne une tache de dimensions constantes sur le plan de la source.

Aux limites, A' crée la tache Ta centrée par A, B' la tache Tb centrée par B, les deux taches étant tangentes en H.

Tout point S, compris entre les extrémités Ea et Eb, est éclairé par la source secondaire T' créée par H.

Nous pouvons ainsi modéliser l'éclairement dû à la source H par une grandeur proportionnelle à la surface S1, intersection entre les deux taches de dimensions égales, centrées par S et H. La contribution de H étant nulle hors des limites Ea et Eb, et maximale si S est confondu avec H.

Si la tache est une ellipse (cas de l'astigmatisme), Es est proportionnel à

$$\frac{1}{\pi \cdot Pv \cdot Pw} * S1$$

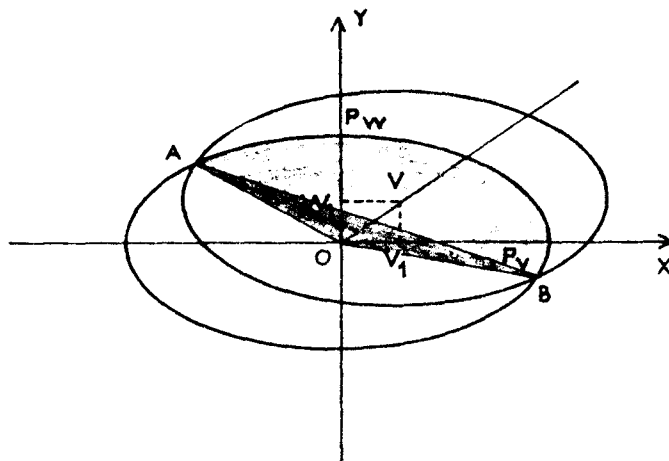


FIGURE 2.11

Dans notre cas, le calcul revient (fig. 2.11), à obtenir la surface S1 équivalente à l'intersection entre deux ellipses d'équations :

$$\frac{X^2}{Pv^2} + \frac{Y^2}{Pw^2} = 1 \quad (3.4)$$

$$\frac{(X - V1)^2}{Pv^2} + \frac{(Y - W1)^2}{Pw^2} = 1 \quad (3.5)$$

avec (V1, W1) coordonnées du point (S) pour lequel on calcul l'éclairement.

S1 est donné par :

$$S1 = 2 * (S2 - ST)$$

avec

$$S2 = \frac{Pv.Pw}{2} * (\text{Arctg} \left(\frac{Pv}{Pw} * T2 \right) - \text{Arctg} \left(\frac{Pv}{Pw} * T1 \right))$$

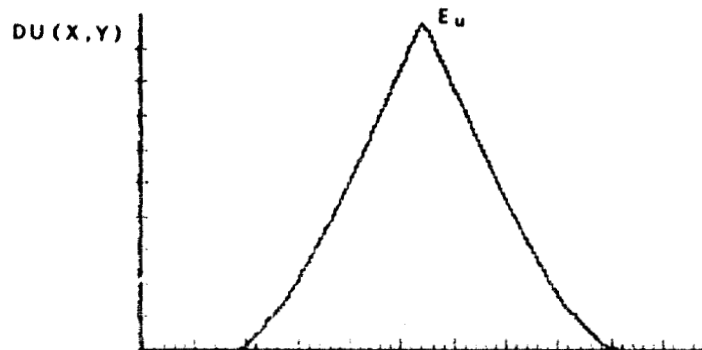
et $T1 = Y1 / X1$

$T2 = Y2 / X2$

$ST = 0,5 * (X2 * Y1 - Y2 * X1)$

où L(X1, Y1) et M(X2, Y2) sont les points de l'intersection des deux ellipses.

Cette répartition de l'éclairement varie de E_u jusqu'à 0 (fig. 2.12).



REPARTITION LUMINEUSE
DE TYPE CONVOLUTIVE

FIGURE 2.12

II. 4.3 ECLAIREMENT D'UN POINT QUELCONQUE.

De cette analyse une remarque très importante est dégagée :

Toute source (H), élément du plan de la source, forme sur ce plan, par retour, une tache lumineuse de surface S et centrée par (H).

Pour connaître l'éclairement reçu (en retour) par un point (H), il faut considérer deux aspects :

1) la lumière issue du point source (H) forme en retour sur le plan source une surface éclairée S centrée par (H).

2) le point (H) reçoit de la lumière de tous les points sources situés dans la surface S.

Calculer l'éclairement d'un point quelconque K du plan de la source, revient à ajouter la contribution de chaque source ponctuelle commune à la surface centrée par K et à la zone lumineuse.

Nous pouvons ainsi définir la zone participant à l'éclairement du point K, représenté en hachure sur la figure ci-dessous (fig. 2.13).

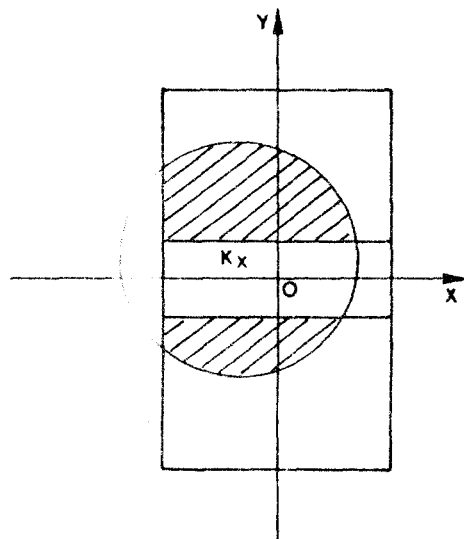


FIGURE 2.13

II. 5 INTRODUCTION DES PERTUBATIONS EXPERIMENTALES .

Dans l'étude menée jusqu'à présent, nous avons considéré que la fente noire était toujours placée dans un plan perpendiculaire à l'axe optique du système.

Expérimentalement, deux problèmes apparaissent :

- L'inclinaison du miroir par rapport à l'axe optique.
- La séparation des centres optiques des différents dioptrés.

II.5.1 INCLINAISON DE LA FENTE

La réalisation expérimentale nous amène à incliner l'axe de cette fente noire par rapport à l'axe optique, pour des raisons de positionnement physique des éléments constitutifs du système.

Etudions les perturbations amenées par cette modification dans la qualité des résultats obtenus.

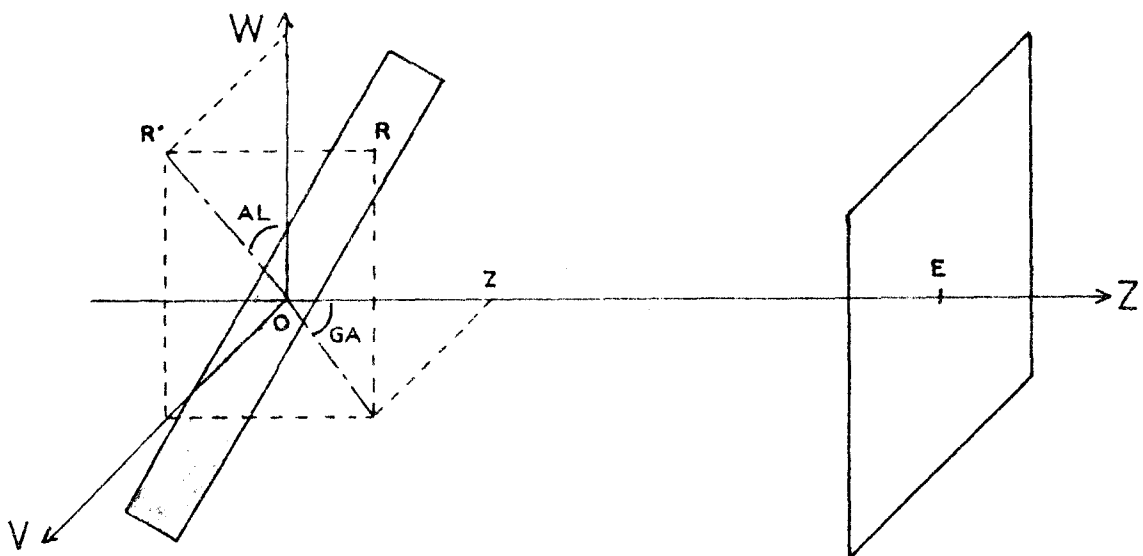


FIGURE 2.14

Deux types de corrections sont à apporter :

a) La distance séparant chaque point de la fente noire du plan de l'écran n'est plus constante et varie en fonction de AL (angle de rotation du miroir dans son plan) et de GA (angle que fait le plan de la fente avec l'axe optique du système), (fig. 2.14) d'où modification de la taille des taches lumineuses obtenues par retour inverse sur la fente noire.

b) Par projection, la taille apparente de la fente noire est changée , sa surface varie en fonction des angles AL et GA , d'où modification de la surface du photodétecteur.

Calculons les projections des différents éléments dans le même plan (V,W).

Les coordonnées du point R s'écrivent :

$$\begin{cases} W = R \sin AL \\ V = R \cos AL \cos GA \\ Z = R \cos AL \sin GA \end{cases} \quad (I)$$

La projection OR' de OR sur le plan (V,W), s'exprime par

$$R' = R \cos^2 GA \cos^2 AL + \sin^2 AL$$

que nous noterons par

$$R' = R \cdot PV (GA, AL)$$

Connaissant la longueur totale LX du photodétecteur, nous en déduisons sa dimension L'X projetée sur le plan (V,W),

$$L'X = LX \cdot PV (GA, AL)$$

La largeur apparente D' de la fente noire, connaissant D sa largeur réelle, est donnée par (rotation de 90°) :

$$D' = D * \sin^2 AL * \cos^2 GA + \cos^2 AL$$

que nous noterons par

$$D' = D * PW (GA, AL)$$

La surface apparente de la fente noire est donc égale à $D' * L'X$.
Si la surface totale de la source est égale à S , sa surface envoyant des rayons lumineux dans la direction de l'écran sera

$$S' = S - (D' * L'X)$$

Calcul de la différence de distance ZE entre chaque point R de la fente noire et le plan de l'écran :

Connaissant V et W , la position du point P dans le plan de la fente (système d'équation I), nous pouvons exprimer OZ en fonction de V

$$R = \frac{V}{\cos AL * \cos GA}$$

$$\Rightarrow OZ = \frac{V}{\cos AL * \cos GA} * \cos AL * \sin GA$$

d'où $OZ = V \tan GA$

et l'on en déduit la distance ZE séparant le point R de l'écran (E),
connaissant la distance OE séparant le plan (V,W) de l'écran

$$ZE = OE - OZ = OE - V \cdot \tan GA$$

II.5.2 SEPARATION DES DIOPTRÉS.

Dans toute l'étude théorique effectuée précédemment, nous avons considéré que les lentilles connue et inconnue (cristallin), possèdaient le même centre optique et nous avons utilisé la puissance globale dans nos calculs.

En pratique, les lentilles ne sont pas confondues et la distance séparant leurs centres est variable (les patients n'ont pas tous la même morphologie de la région oculaire).

Déterminons dans un premier temps quelle est l'influence de la distance sur la qualité des mesures, par utilisation du calcul matriciel appliqué à l'optique, en considérant toujours les rayons paraxiaux.

Dans un second temps, nous étudierons un système optique possédant trois lentilles, étude nécessaire pour l'extension au frontofocomètre.

1. Système à deux lentilles.

Soit C_1 et C_2 les puissances de deux lentilles séparées par une distance e_1 , la lentille C_1 étant située à la distance R_1 de la source et C_2 à la distance R_2 de l'écran (fig 2.15).

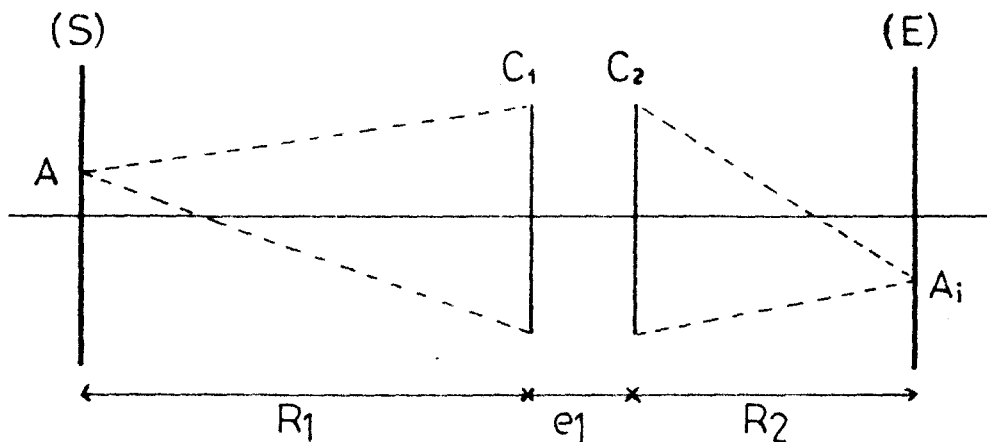


FIGURE 2.15

La matrice de transfert de l'ensemble est donnée par :

$$\begin{bmatrix} y \\ A1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M1 & M2 \\ M3 & M4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ A1 \end{bmatrix}$$

avec

$$\begin{bmatrix} M1 & M2 \\ M3 & M4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -c1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & e1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -c2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ A1 \end{bmatrix}$$

En développant nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} M1 & M2 \\ M3 & M4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -C2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M1 & M2 \\ M3 & M4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -C2 B & R2 (A - C2 B) + B \\ C & -C2 D & R2 (C - C2 D) + D \end{bmatrix}$$

Avec $A = 1 - C1R1$

$B = e1 (1 - C1R1) + R1$

$C = -C1$

$D = -C1 e1 + 1$

Lorsque le système est focalisé, c'est dire que tous les rayons passant par A émergent en passant par A', les plans (S) ET (E) sont conjugués. Cette caractéristique entraîne que $M2 = 0$

Exprimons $C2 = F(C1)$:

$$M2 = 0 \Leftrightarrow R2(A - C2B) + B = 0$$

$$\Leftrightarrow C2 R2 B = B + R2 A$$

En développant, nous obtenons

$$C2R2 (e1(1-C1R1) + R1) = R1 + R2 - C1R1R2 + e1(1 -C1R1)$$

2. Système à trois lentilles.

Reprenons le calcul de $C2 = f(C1)$ en ajoutant une troisième lentille telle que l'écran E soit placé au foyer de cette lentille $C3$ (fig. 2.16)

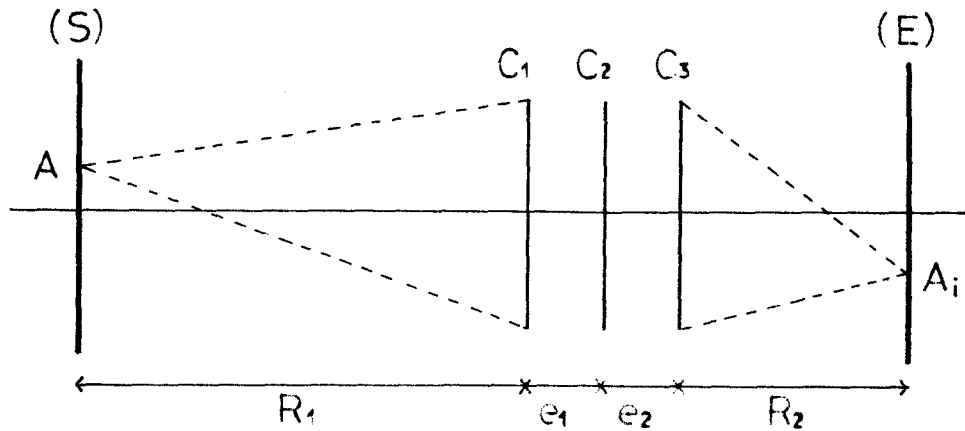


FIGURE 2.16

La matrice de transfert de l'ensemble est donnée par

$$\begin{bmatrix} y \\ A_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M1 & M2 \\ M3 & M4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ A \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -C2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -E & F \\ G & H \end{bmatrix}$$

avec A, B, C, D calculés précédemment et

$$E = 1 - C3C2$$

$$F = R2 (1 - C3e2) + e2$$

$$G = -C3$$

$$H = -R2C3 + 1$$

Après développement et regroupement des termes, nous obtenons :

$$\begin{aligned} & C2(R1R2 + e1R2(1 - C1R1) + e2R1(1 - R2C3) + e1e2(1 - R2C3)(1 - C1R1)) \\ & = R1 + R2 - R1R2(C1 + C3) + e1((1 - C1R1) - R2C3(1 - C1R1)) + e2((1 - R2C3) - C1R1(1 - C3R2)) \end{aligned}$$

Ces calculs serviront à déterminer l'influence des distances entre centres (e1 et e2) sur la focalisation du système, et à établir les corrections à apporter, surtout dans le cas des puissances élevées, puis d'en dégager les incertitudes de mesures.

C H A P I T R E - I I I

IMPLANTATION SUR MICRO - ORDINATEUR ET RESULTATS.

III.1 IMPLANTATION

Cette étude a été réalisée sur micro - ordinateur Apple II, outil très commode par sa facilité de programmation en Basic et ses possibilités graphiques, essentielles pour notre travail,

Par contre, sa faible vitesse de calcul (malgré l'utilisation d'un compilateur Basic) et sa capacité mémoire limitée à 48 Koctets ont représenté un handicap lors de l'écriture et de l'exploitation du programme.

III.1.1 PRESENTATION.

La mise en équation du système ayant été réalisée de manière forcément imparfaite du fait de la complexité des mécanismes analysés et de la puissance limitée du calculateur, nous avons pallié à ces insuffisances par une représentation qualitative de l'éclairement dont l'étude est réalisée par analyse graphique.

Les temps de calcul étant prohibitifs pour une visualisation en temps réel des résultats, l'analyse des courbes a dû être effectuée en temps différé par un programme spécifique, d'où la méthodologie employée :

- Utilisation d'une procédure cataloguée EXEC.

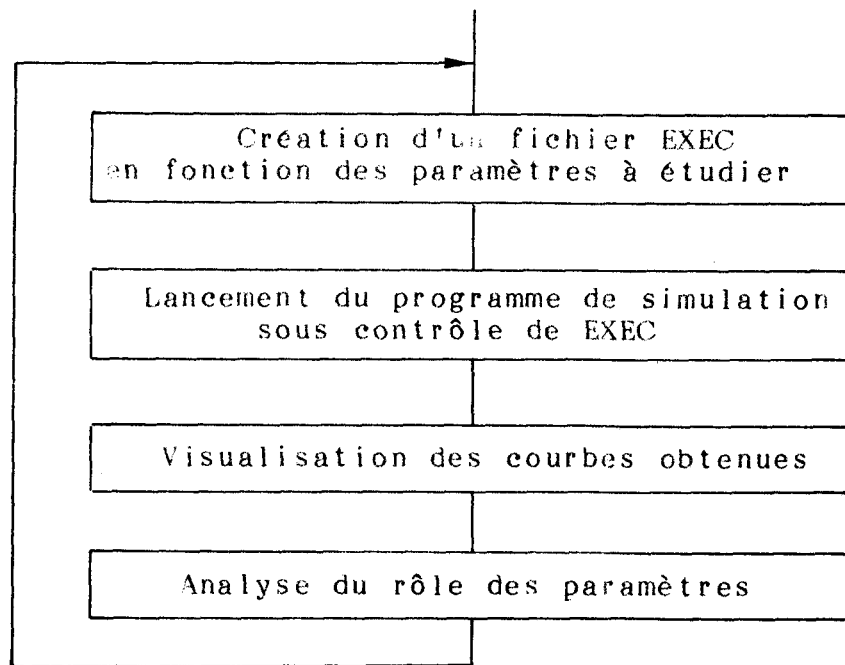
Cette commande est semblable à la commande RUN qui exécute le programme, mais un fichier stocké sur disquette se substitue à l'opérateur pour donner des ordres successifs

au micro - ordinateur, sans utilisation du clavier.

Cette procédure permet de définir le travail que doit effectuer le calculateur et de faire exécuter le programme de manière autonome, les résultats étant mémorisés sur disquettes.

- exploitation des résultats.

Le travail terminé, en utilisant un programme permettant de visualiser les courbes mémorisées, nous pouvons les étudier et définir une nouvelle procédure EXEC en fonction des résultats observés.

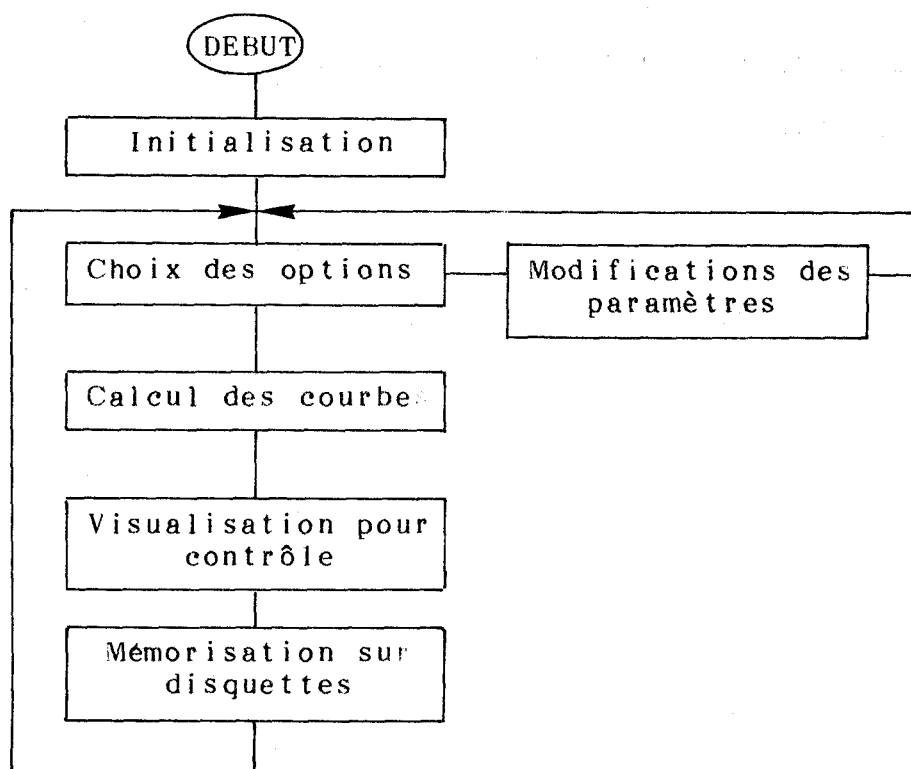


111.1.2 ORGANISATION DU PROGRAMME.

Afin de rendre le programme le plus souple possible, nous nous sommes imposés une grande liberté dans le choix du type de courbes à tracer et des paramètres à étudier.

En ajoutant quelques lignes de programmes au tronc commun existant, et en utilisant les utilitaires déjà

implantés, de nouvelles fonctions sont aisément disponibles.



1.1.1.3 ANALYSE DES FONCTIONS IMPLANTEES.

Nous n'étudierons ici que les principales étapes du programme, ainsi que les sous - programmes correspondant aux paramètres analysés par la suite.

Le listing complet du programme est donné annexe 4.

1. Initialisation.

Dans cette partie du programme, les tableaux de variables sont dimensionnés et les constantes sont attribuées pour toute la suite des calculs.

Les fonctions définies au chapitre précédent sont implantées de manière à pouvoir être appelées

rapidement lors du déroulement du programme.

Une table de valeurs alphanumériques est mémorisée pour faciliter l'enregistrement sur disquettes des fichiers calculés.

2. Choix des tracés.

SRUN

MENU

- 1 INITIALISATION TRACE
- 2 COURBE EXPERIMENTALE
- 3 ECLAIREMENT =F(Y)
- 4 REPARTITION LUMINEUSE TACHE
- 5 RAYON TACHE = F(FOCALE)
- 6
- 7 MODIFICATIONS PARAMETRES
- 8 PARAMETRE =F(DI)
- 97

A part l'"Initialisation tracé", qui remet tous les paramètres à leurs valeurs initiales, le menu propose une large variété de courbes pour décrire correctement le système optique simulé.

3. Modifications des paramètres.

Cette phase correspond à l'attribution de valeurs numériques aux paramètres que nous désirons étudier.

La liste n'étant pas exhaustive, nous ne la donnons ici qu'avec les paramètres employés dans notre travail, telle qu'elle est affichée lors de l'exécution du programme:

0 SANS MODIFICATION	0
1 LARGEUR FENTE	7
2 NOMBRE FENTES	1
3 LARGEUR DETECTEUR	7
4 DISTANCE S-L	333.33
5 DISTANCE S-E	404.76
6 VAL.DIOPT EN V	20
7 TYPE TACHE	U
8 NB INTERV. X-Y	2
9 NB INTERV. V-W	2
10 VAL.LENT.DISQUE	-3
11 LARGEUR DET. X	7
12 VAL.DIOPT EN W	20
13 ANGLE X,V DE ROT.	0
14 TAILLE SOURCE X	7
15 TAILLE SOURCE Y	7
16 FORME SOURCE	E
17 PUPILLE	9
18 DD DEBUT E/DI (GEN)	-11
19 DT FIN E/DI	11
20 DP PAS E/DI	1
21 V AXE E/Y	0
22 E DIST. LENT.	0
23 ROTATION MIROIR	0

Deux classes distinctes de paramètres sont étudiés:

- Ceux appartenant en propre à la simulation.
- et ceux déterminant la géométrie du système

étudié.

Paramètres propres à la simulation:

- T\$: répartition de l'éclairement de type uniforme ou de type convolutive. Pour simplifier l'écriture, nous dirons Uniforme U ou Progressive P.

- Ny, Nx : nombre de pas de l'intégration servant au calcul de la surface de la zone participant à l'éclairement

d'un point. Nous considérerons toujours que $N_y=N_x$.

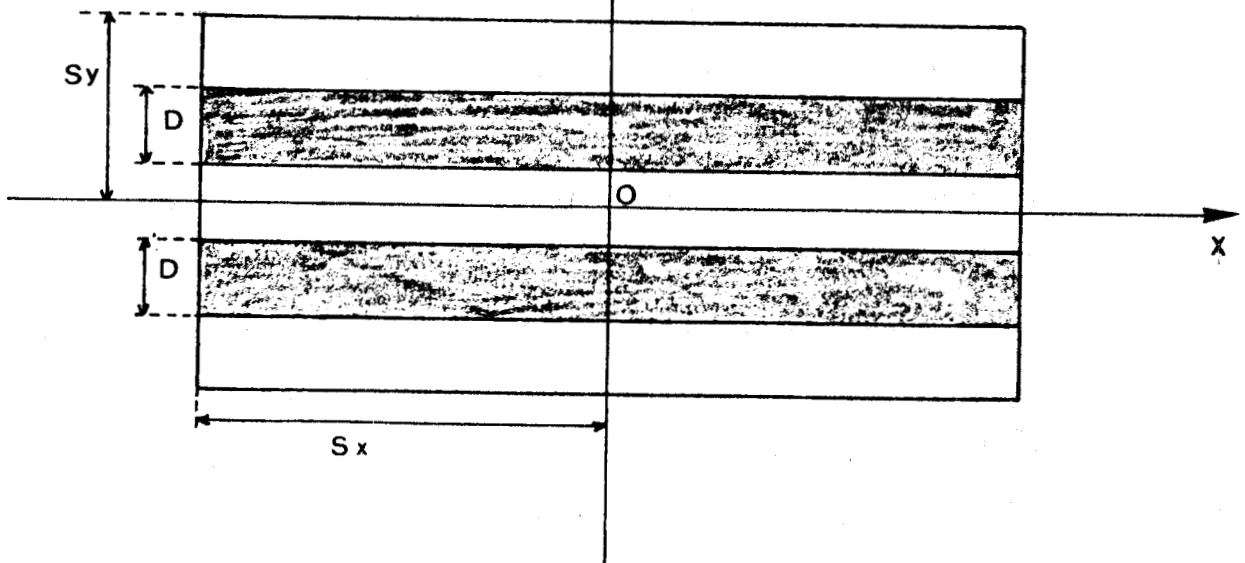
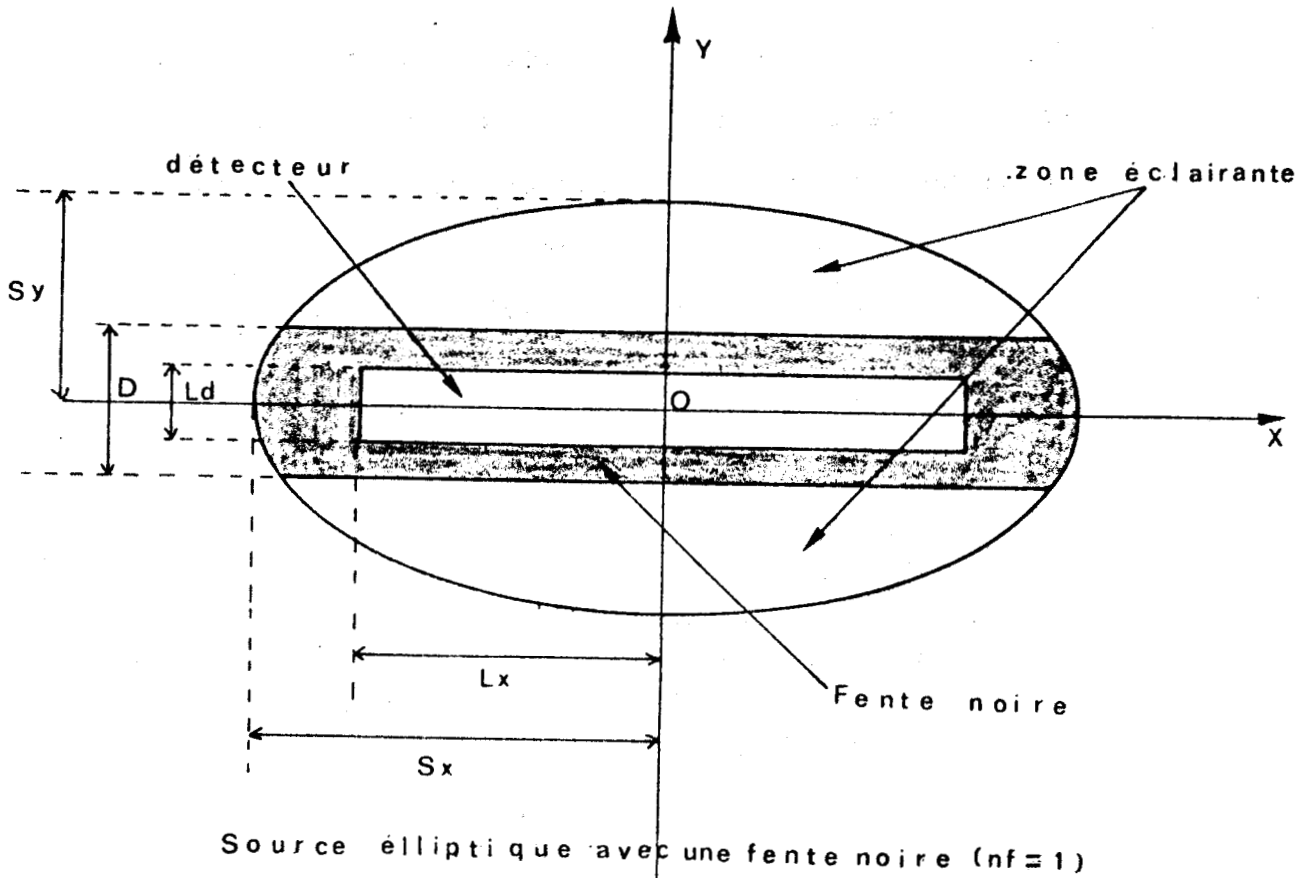
- N_w, N_v : nombre de pas de l'intégration donnant la somme de tous les éclairagements recus par le détecteur ($N_w=N_v$).

Les quatre derniers paramètres doivent être fixés dès le début de la simulation. En effet, en adaptant les autres variables de la simulation aux mesures effectuées sur le banc optique, nous devons choisir les valeurs de N_y, N_x et N_w, N_v offrant le meilleur compromis entre la rapidité de calcul, et une précision cohérente avec les résultats expérimentaux.

Paramètres correspondant à la géométrie du système.

a) S_x, S_y , exprimés en mm, caractérisent la source lumineuse, D correspond à l'épaisseur des fentes noires et N_f leur nombre (fig. 3.1).

L'orientation de la source est caractérisée par son inclinaison GA par rapport à l'axe optique et par AL , inclinaison par rapport au plan de l'écran (exprimés en degrés)



Source rectangulaire avec deux fentes noires ($nf=2$)

FIGURE 3.1

La variable alphanumérique F\$ permet le choix du type géométrique Rectangulaire ou Elliptique de la source.

Ces formes géométriques simples sont les seules qui ont été retenues pour cette analyse. D'autres cas plus complexes peuvent être étudiés, mais leur intérêt est faible en ce qui nous concerne (fig. 3.2).

Voici d'autres cas envisagés, mais non retenus :

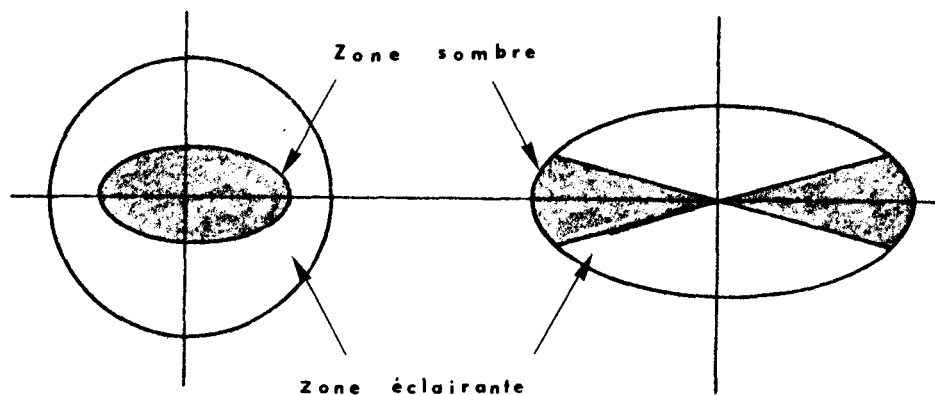


FIGURE 3.2

En effet les points de la zone éclairée éloignés de la fente noire interviennent de moins en moins au fur et à mesure de leur éloignement et ne participent à l'éclairement du détecteur que dans le cas des fortes défocalisations.

De plus, la zone centrale de la fente noire est celle qui reçoit le maximum de lumière après retour inverse, et toute diminution de cette zone retentit fortement sur l'amplitude du signal détecté.

b) L_x , L_d : dimensions du détecteur rectangulaire, ce

détecteur étant inclus dans la fente noire dans notre modèle, $LX \leq SX$ et $LD \leq D$.

c) P : diamètre du diaphragme commun des lentilles.

d) V_v, V_w : distances focales de la lentille inconnue suivant ces axes principaux.

e) D_I : puissance connue de la lentille d'essai sphérique.

f) C_z, E_z : représentent respectivement la distance entre le bloc optique et la source, et entre l'écran et le plan de la source.

Les valeurs numériques de E_z et de C_z , ont une importance réduite et peuvent être considérées comme constantes, leurs valeurs seront envisagées lors de la construction du système en fonction de l'encombrement total désiré.

Dans notre système expérimental, nos constantes ont été choisies telles que :

$C_z = 333.33$ mm, correspondant à la focale d'une lentille de 3 dioptries.

$E_z = 404.76$ mm, telle que le système soit focalisé lorsque la lentille connue D_I à une vergence de -3 dioptries.

4. Simulation des courbes expérimentales.

Cette option permet d'effectuer la simulation de la courbe visualisée sur l'oscilloscope cathodique lors de la manipulation expérimentale.

Le programme calcule les éclairagements reçus par le détecteur pour chaque lentille d'essai interposée sur le trajet du faisceau lumineux, ceci en fonction des paramètres imposés précédemment.

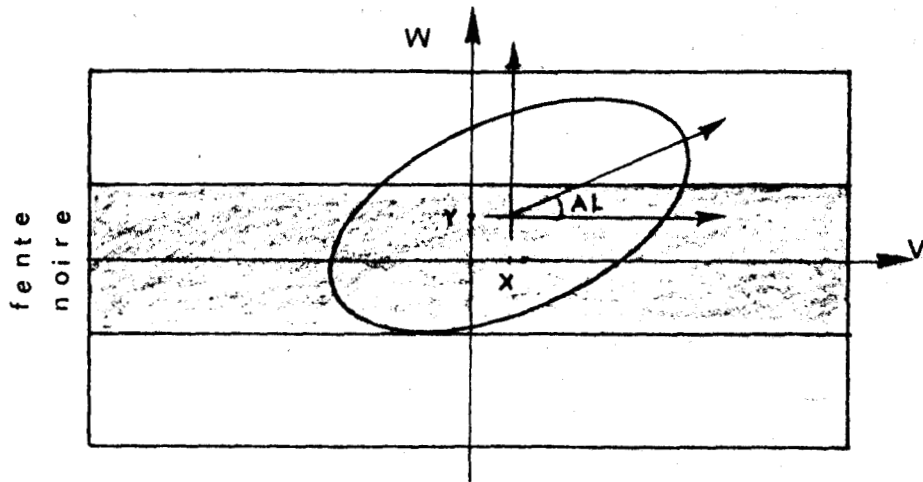
Cette partie est la plus complète car elle utilise la majorité des sous - programmes.

Détaillons les sous programmes employés

a) Calcul des limites des intégrales.

De manière à optimiser le rapport temps de calcul sur précisions du résultat, nous avons dû restreindre au maximum le nombre de calculs effectués.

Dans une première étape, il est nécessaire de définir les différentes coordonnées des points dont on calcule les éclairagements, en fonction du nombre de fentes sombres, de la taille du détecteur et de celle de la source.



Lors du calcul de l'intégrale double déterminant l'éclairement d'un point (X, Y) du détecteur, la sommation est limitée à l'intérieur de l'ellipse entourant les sources ponctuelles participant à l'éclairement de ce point.

b) Calcul de l'éclairement du point étudié en fonction du modèle de tache lumineuse, uniforme ou convolutive.

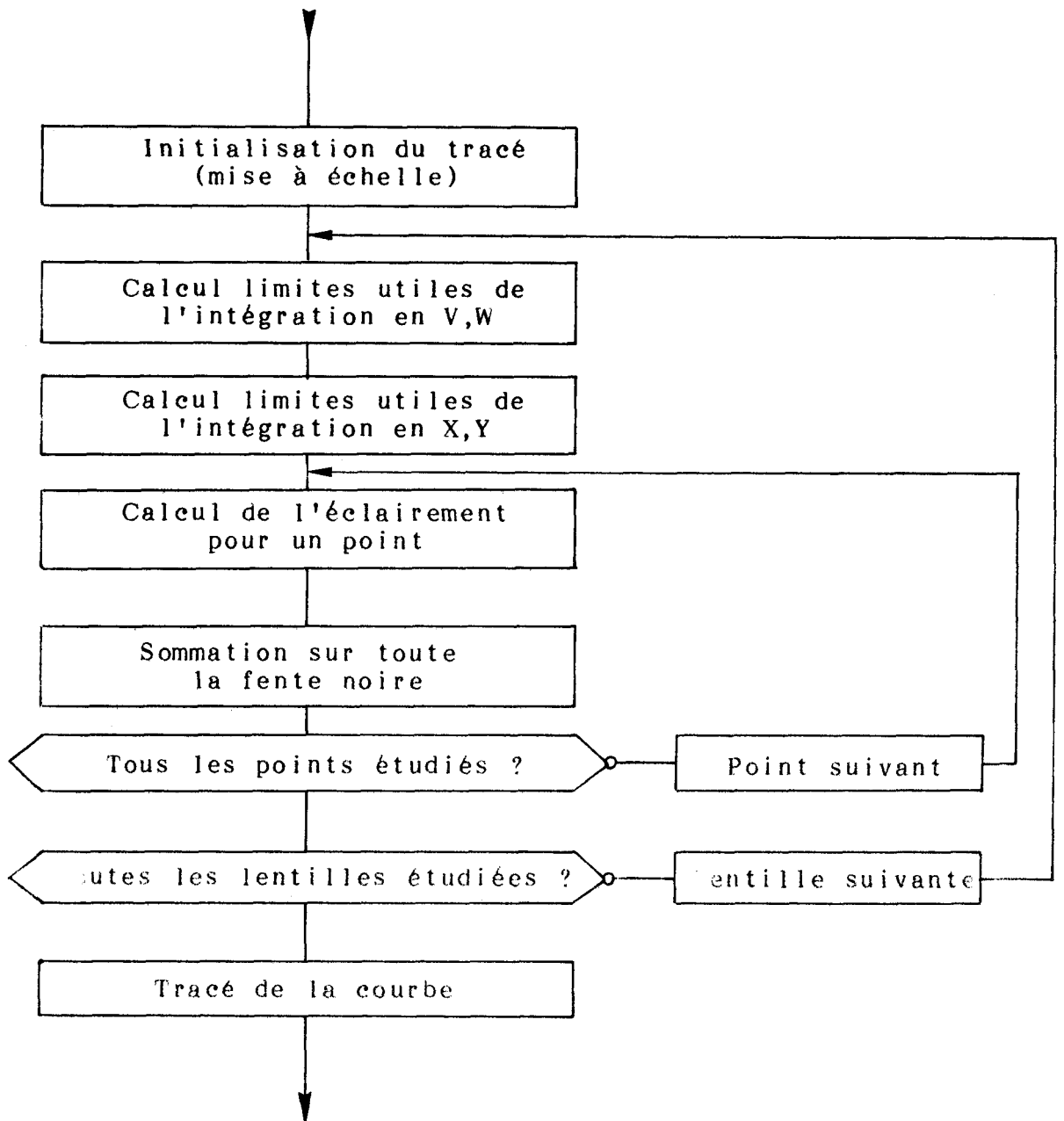
Deux cas se présentent :

- Si le modèle choisi est celui d'une répartition uniforme, la participation des points de la source lumineuse au sein de la zone concernée est constante, et est proportionnelle à l'inverse de la surface de l'ellipse.

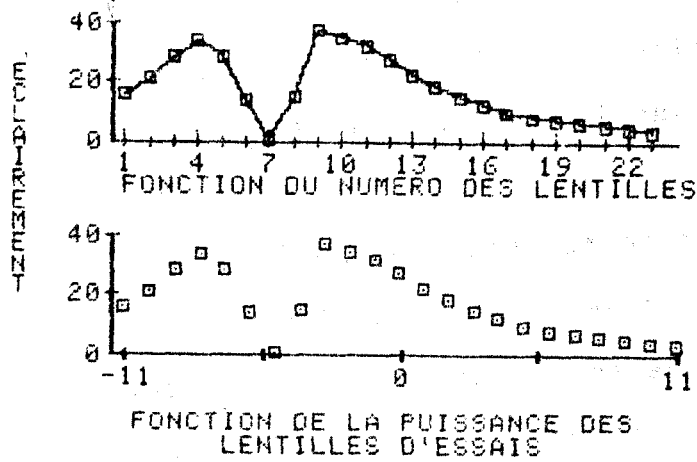
- Si la répartition est du type convolutive, nous devons tenir compte de la distance séparant le point étudié du point participant à son éclairement. Ceci est réalisé par utilisation des fonctions définies précédemment.

Le calcul des intégrales ne pose aucun problème par

l'emploi de la méthode des trapèzes, ce qui permet de concilier une grande simplicité de mise en oeuvre et une précision satisfaisante.



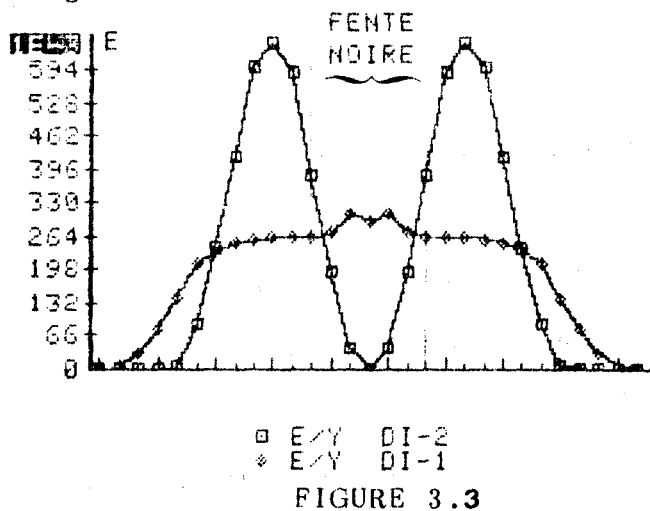
Exemple de courbes obtenues :



5. Distribution axiale de l'éclairement.

Cette possibilité permet d'observer la courbe de répartition transversale de l'éclairement suivant une direction perpendiculaire à la fente noire, dans le plan de la source. Cette fonction est très utile pour apprécier les zones du photocapteur qui reçoivent la plus grande quantité de lumière, en fonction de la position X de l'axe étudié.

Un exemple de ce type de courbe est représenté ci-dessous (fig. 3.3).



On remarque ainsi le rôle important du défaut de focalisation en ce qui concerne la quantité de lumière revenant sur le photodétecteur.

La représentation spatiale (fig. 3.4) de la quantité de lumière revenant sur le plan de la source montre l'importance de la zone centrale du détecteur, ce qui justifie sa forme rectangulaire simple.

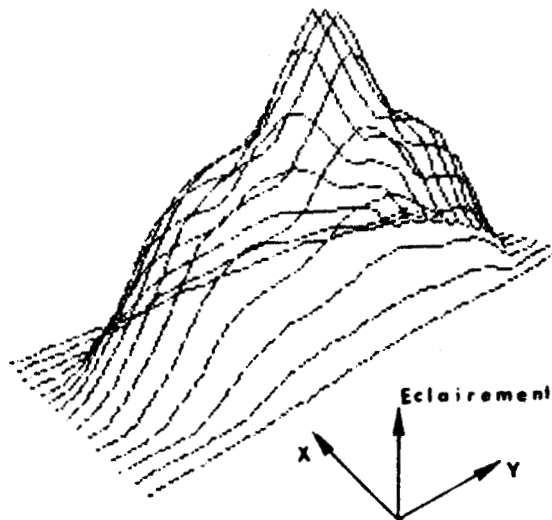
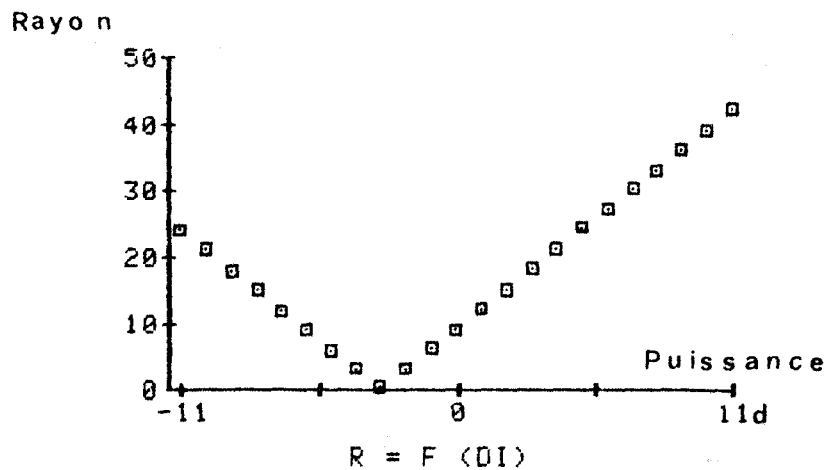


FIGURE 3.4

6. Dimensions de la tache.

Nous représentons le rayon de la tache lumineuse formée sur l'écran en fonction de la défocalisation produite par les lentilles d'essai interposées sur le trajet du faisceau lumineux. Ceci implique l'hypothèse d'une tache circulaire, donc que la lentille inconnue n'est pas astigmatique.

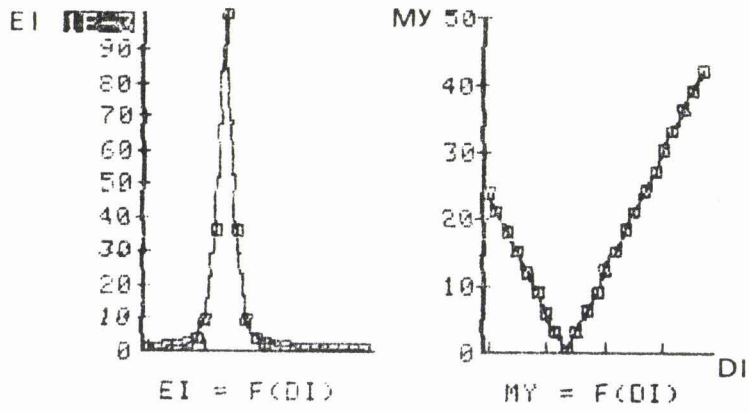
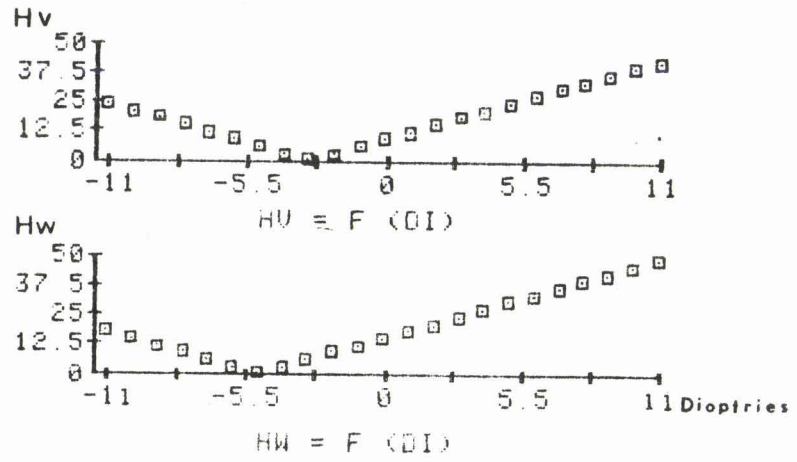
Dans le cas de l'astigmatisme, pour connaître les deux dimensions axiales de la tache produite, il nous suffit d'utiliser deux fois ce sous - programme, en introduisant successivement la valeur de la puissance correspondante en dioptries.



7. Paramètres particuliers.

Cette option permet de représenter les quatre paramètres H_v , H_w (dimensions de la tache lumineuse formée sur le plan du photocapteur), E_i (éclairage, inversement proportionnel à la surface de la tache) et M_y (projection de la tache sur l'axe OV).

Ces courbes sont tracées en fonction de DI, puissance de la lentille d'essai exprimée en dioptries.



III.2 RESULTATS.

Dans le paragraphe III.1, nous avons défini tous les paramètres utiles, modifiables dans le programme. En raison de leur nombre, il est malaisé d'étudier globalement leurs rôles respectifs dans l'éclairément du photocapteur.

Ne pouvant obtenir mathématiquement, de manière absolue, les dimensions physiques de l'ensemble optique optimisant l'éclairément capté, nous avons, par comparaisons de courbes, déduit le rôle respectif de chaque paramètre et ainsi dégagé, de manière précise, les caractéristiques géométriques du prototype.

De ce fait, les valeurs de certaines variables sont fixées par rapport à celles physiquement réalisables sur le banc optique.

A l'initialisation, les paramètres sont fixés comme suit:

Forme elliptique de la source.

$S_y = 6 \text{ mm}$, $S_x = 9 \text{ mm}$, $D = 6 \text{ mm}$, $N_f = 1$

$L_x = S_x = 9 \text{ mm}$, $L_d = D = 6 \text{ mm}$

$P = 9 \text{ mm}$

$V_v = 20$ et $V_w = 22$ (lentille astigmatique)

III.2.1 ETUDE DES PARAMETRES PROPRES
A LA SIMULATION.

1. Nombre de pas d'intégration.

Pour un système parfaitement focalisé, la courbe suivante représente l'évolution de l'éclairement $E=f(Y)$ reçu au niveau de la source par retour inverse de la lumière. N_y , nombre de pas de l'intégration suivant l'axe Y, est choisi égal à 2, 5 et 8 (fig. 3.5).

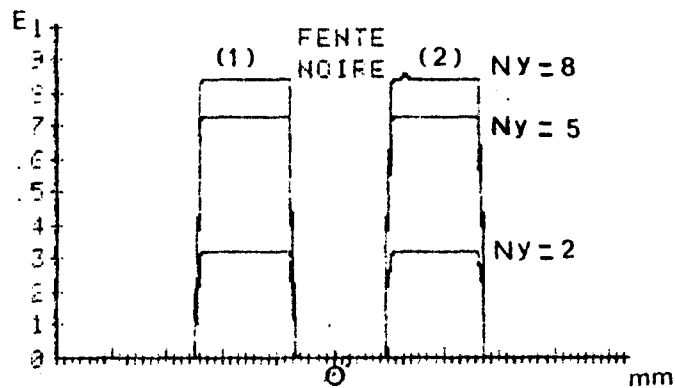


FIGURE 3.5

Au niveau de la zone éclairée (1) (2), la quantité de lumière reçue est proche de 1, et est nulle pour la zone correspondant à la fente noire.

Il est évident que plus le nombre de pas dans le calcul de l'intégrale sera grand et plus précis sera le résultat. Mais pour augmenter la rapidité de calcul, nous sommes obligés de déterminer un compromis rapidité / précision pour attribuer les valeurs de N_y et N_w .

$N_y=5$ offre le meilleur compromis rapidité / précision, car peu de changements sont notables entre $N_y=5$ et $N_y=8$.

Lorsque le système est défocalisé ($D_i=-2$ et $D_i=0$ dioptries), nous obtenons le graphique suivant (fig. 3.6).

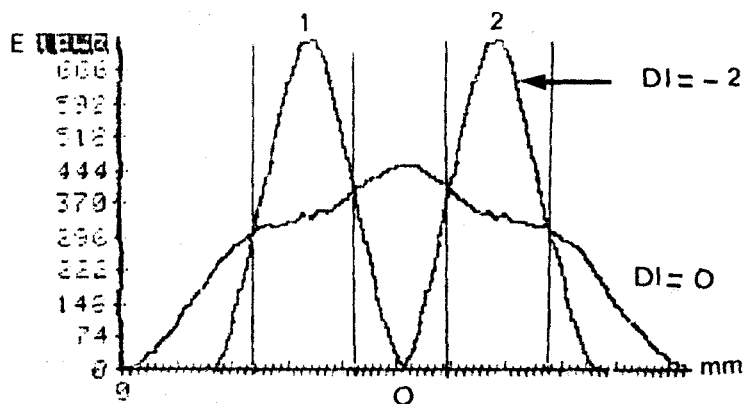


FIGURE 3.6

Au niveau de la fente noire, l'éclairement varie faiblement, N_w n'a pas besoin d'être très élevé. Une valeur de $N_w=3$ est acceptée pour la suite de notre étude.

2. Choix du modèle de tache.

Comparons le tracé $E=f(D_i)$ pour une structure de tache uniforme U ou progressive P (fig. 3.7), avec celui obtenu sur le banc optique (fig. 3.8).

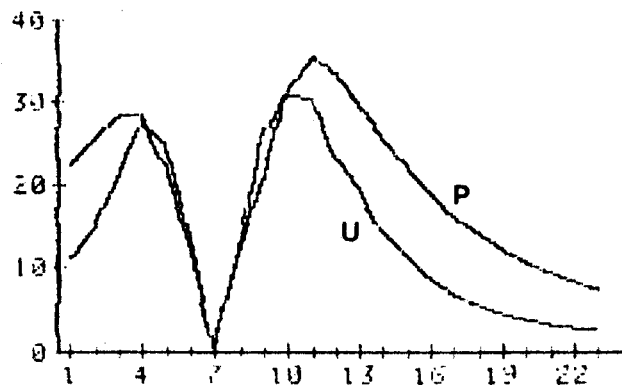


FIGURE 3.7

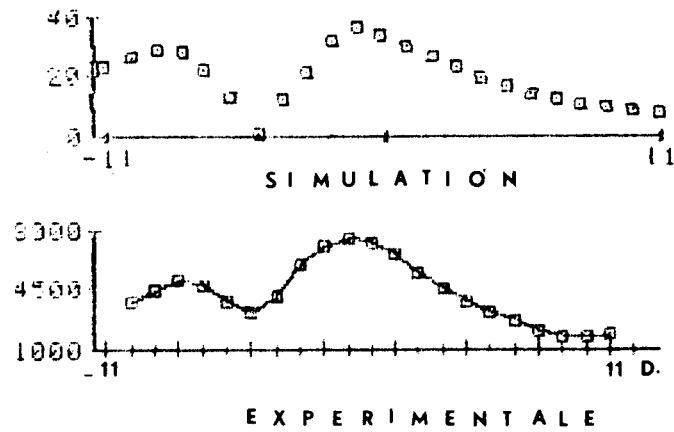


FIGURE 3.8

Le tracé calculé le plus proche de celui réalisé expérimentalement est celui obtenu avec la structure de tache P pour les fortes défocalisations.

On remarque qu'il existe peu de différences entre les courbes obtenues pour les modèles de type U ou de type P

lorsque le système est peu défocalisé (lentilles 4 à 11).

Par contre, en utilisant une tache de type U la courbe est moins étalée. Nous utiliserons cette caractéristique pour étudier les différents paramètres propres au système physique, la position des maxima étant plus accentuée.

La compréhension des mécanismes internes est facilitée par l'utilisation d'un éclairage uniforme. Il suffira alors de raisonner par surfaces uniformes et d'additionner les éclairagements sans tenir compte de la répartition lumineuse au sein des taches.

III.2.2 ETUDE DES PARAMETRES DU SYSTEME.

1. Dimensions de la source.

Pour $S_y=13$ mm et $A_1=0^\circ$, l'éclairage reçu par le détecteur est légèrement plus important lorsque la source est rectangulaire plutôt qu'elliptique (fig. 3.9), la surface émettrice de lumière est plus étendue et la courbe est faiblement modifiée.

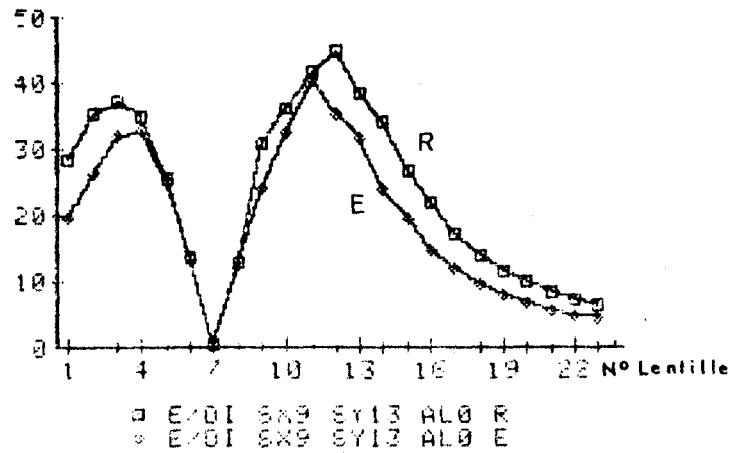


FIGURE 3.9

Rôle de la largeur Sy.

Comparons maintenant l'intensité de l'éclairement pour $\text{Al}=0^\circ$ et Sy égal à 5, 9 ou 13 mm (fig. 3.10), en imposant à la source une forme rectangulaire.

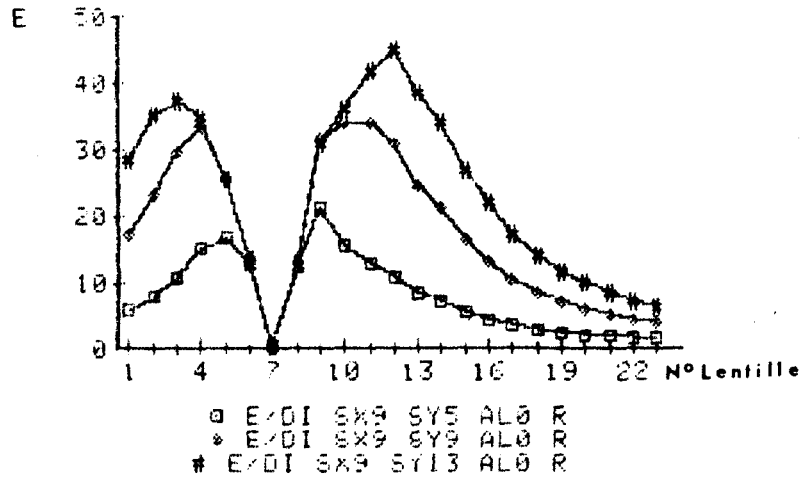


FIGURE 3.10

Pour une largeur de fente noire D constante et S_x constant, l'amplitude de la courbe augmente lorsque Sy augmente. Par contre, on observe un décalage des maxima qui

s'écartent du minimum, sans toutefois modifier notablement la courbe autour de ce minimum.

En faisant varier α_1 (0, 45, 90 degrés), nous nous apercevons que pour $\alpha_1=45^\circ$, l'éclairement correspondant à la meilleure focalisation du système n'est plus nul (fig. 3.11). Ceci est dû à la dissymétrie de la tache (lentille inconnue astigmatique). Nous avons représenté les variations de H_v et de H_w , dimensions axiales de la tache lumineuse elliptique produite par la lentille astigmatique en fonction des lentilles d'essai interposées sur le trajet lumineux (fig. 3.12).

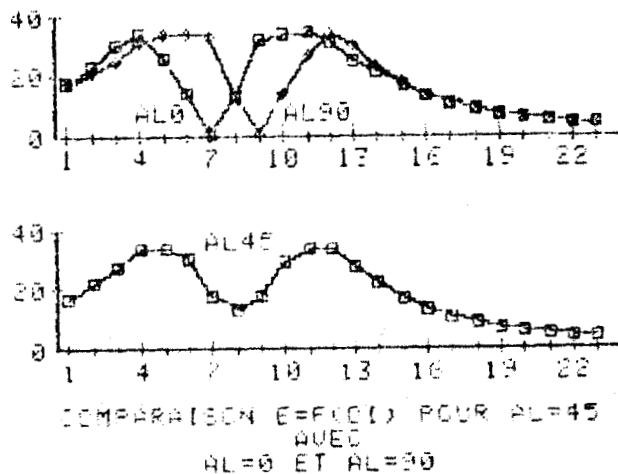


FIGURE 3.11

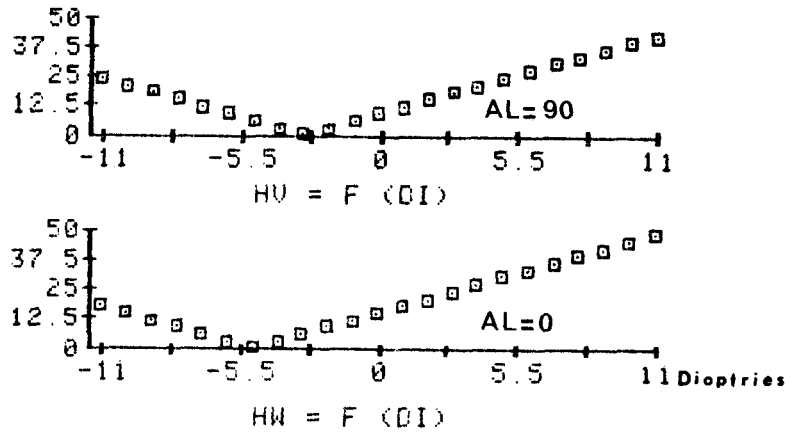


FIGURE 3.12

Le minimum correspondant à la focalisation n'est qu'un compromis entre les deux minima précédents. Il n'y a focalisation du système que pour $AL=0$ ou 90° .

Rôle de la longueur S_x .

A S_y constant et L_x , longueur du détecteur, égale à S_x , nous observons un accroissement important de l'amplitude de la courbe $E=f(DI)$ en fonction de S_x (fig. 3.13).

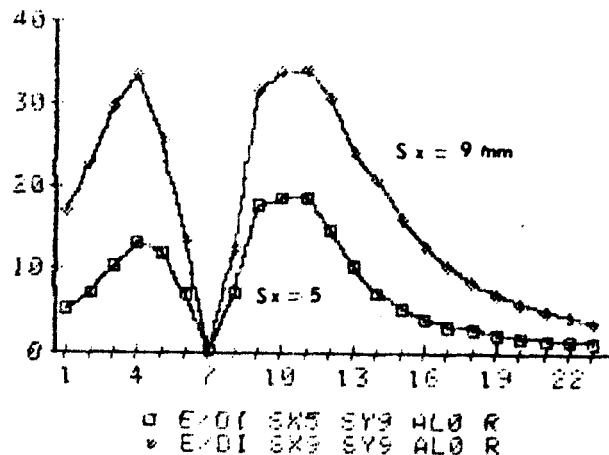


FIGURE 3.13

Pour $S_x=5$ mm et $Al=0$ ou 90 degrés (fig. 3.14), nous observons une très nette dissymétrie entre les amplitudes des deux pics caractéristiques de la courbe, alors que pour $Al=45^\circ$ (fig. 3.15), les maxima ont même amplitude.

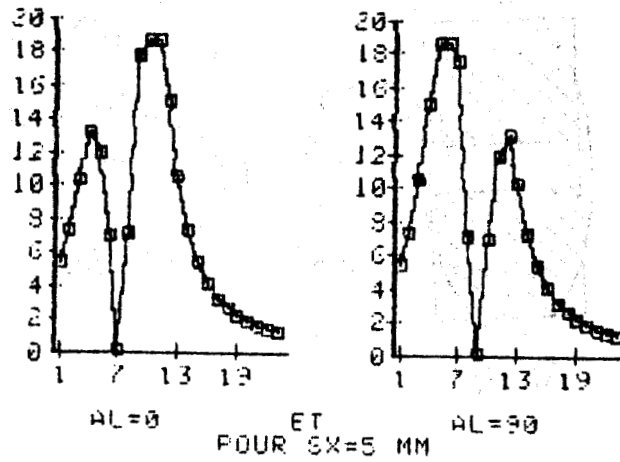


FIGURE 3.14

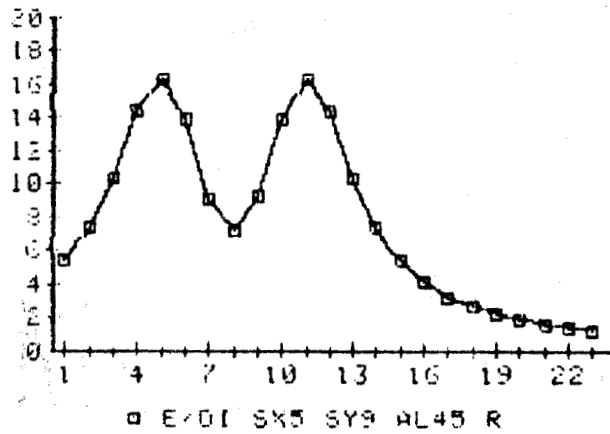


FIGURE 3.15

Une représentation graphique des zones participant à l'éclairement du point central (fig. 3.16), montre clairement la différence de participation lors d'une rotation de 90° .

Dans notre exemple, l'ellipse représente la surface d'une tache lors d'une défocalisation correspondant à un maximum de la courbe précédente.

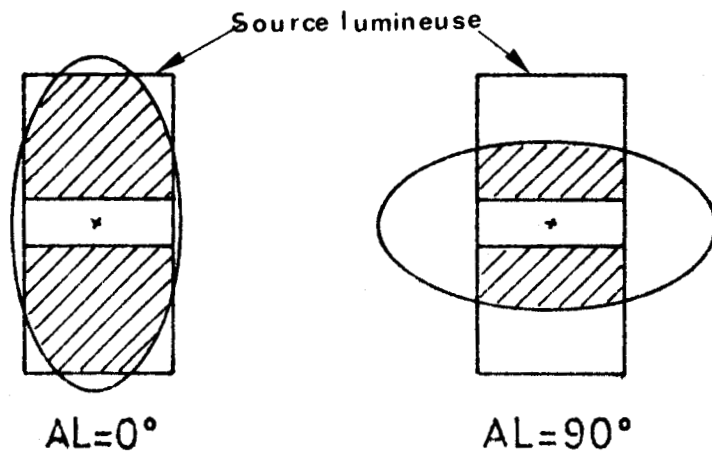


FIGURE 3.16

Par contre, pour une source symétrique ($S_x=S_y=9$ mm), les maxima ont une même amplitude (fig. 3.17).

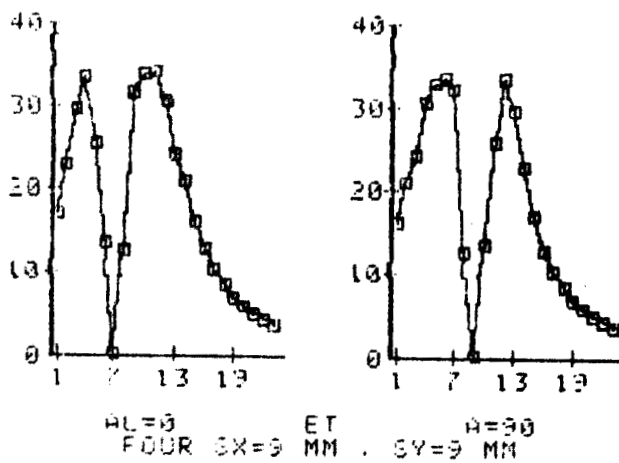


FIGURE 3.17

2. Largeur de la fente noire.

Cette étude se révèle particulièrement intéressante par la qualité des résultats obtenus.

Simplifions l'étude, en considérant:

- La lentille étudiée non astigmatique ($V_v = V_w$).
- La source rectangulaire.
- La longueur de la fente noire égale à la longueur du détecteur ($L_x = S_x$).
- L'épaisseur du détecteur égale à celle de la fente ($L_d = D$).

Dans ces conditions, pour une défocalisation donnée, la tache formée sur le plan du détecteur et issue d'un point de la source, est circulaire, de rayon R .

En prenant une largeur de la source lumineuse égale au rayon de la tache ($S_y = R + (D/2)$) et en faisant varier $R_a = D / R$, rapport de la largeur de la fente noire par le rayon de la tache, nous obtenons le tracé représenté ci - dessous (fig. 3.18).

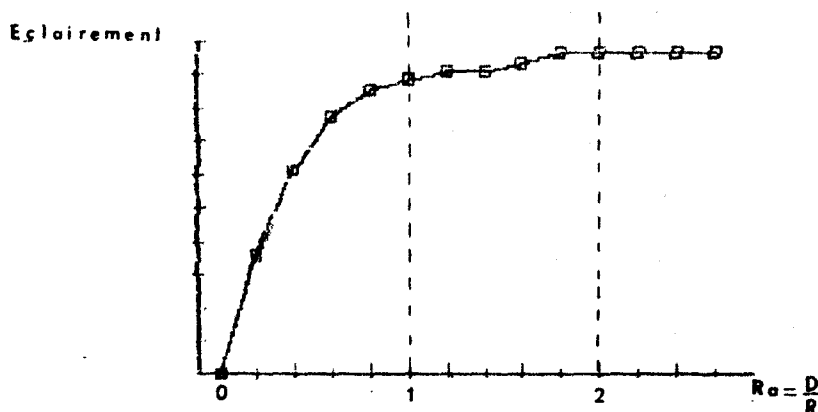


FIGURE 3.18

L'éclairement croît rapidement pour $0 < Ra < 1$, puis lentement lorsque $1 < Ra < 2$.

Cette évolution se retrouve sur la courbe $E = f(DI)$ (fig. 3.19).

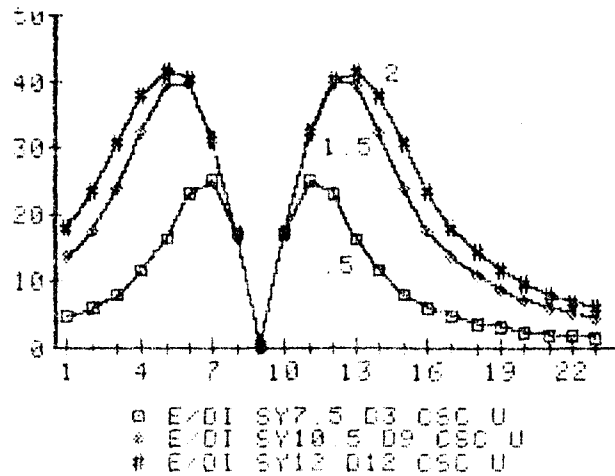


FIGURE 3.19

Il est ainsi possible d'imposer la position des maxima de part et d'autre du minimum, en calculant la taille de la zone lumineuse et de la fente noire, par rapport à la dimension de l'image produite par une défocalisation souhaitée.

3. Nombre de fentes noires.

En maintenant fixe le rapport surface zone sombre / surface zone éclairée, ce rapport étant égal à 1 ($D=Sy/Nf$ et $Ld=D$), nous avons étudié l'effet du nombre Nf de fente sur le résultat obtenu (fig. 3.20).

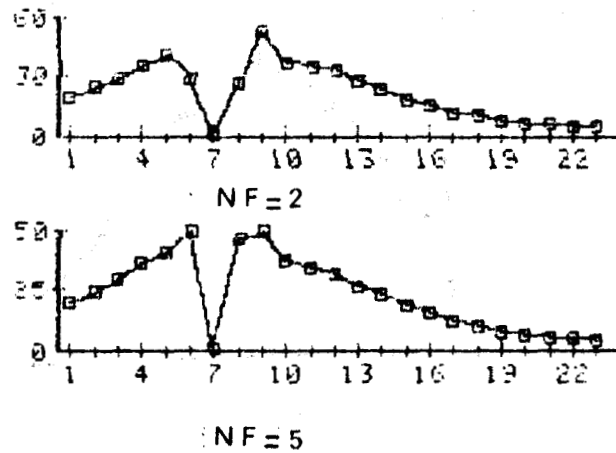


FIGURE 3.20

L'amplitude de la courbe n'augmente pas avec le nombre de fentes. Par contre, le nombre d'informations caractérisant la région du minimum est diminuée. Ceci entraîne une difficulté lors de l'interpolation de ces courbes, interdisant une précision inférieure à la dioptrie.

Dans le cas où le nombre de fentes N_f est égal à 4, le minimum caractéristique n'est plus décelable, lorsque l'angle de rotation A_1 est de 45 degrés (fig. 3.21)

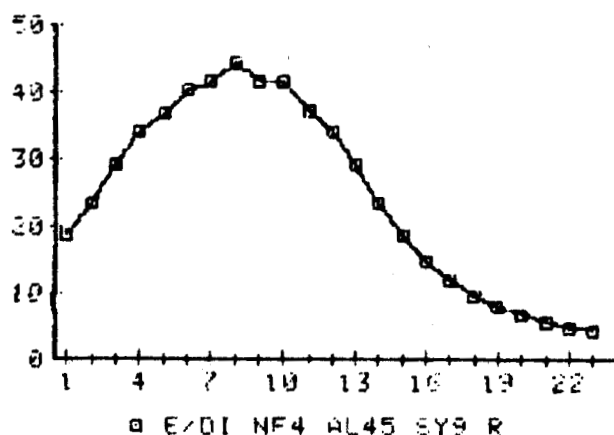


FIGURE 3.21

4. Dimensions du détecteur.

Rôle de la longueur L_x .

Pour des conditions telles que $D=S_y=9$ mm, $L_d=D$ et $S_x=S_y$, nous constatons que la dynamique du signal augmente avec L_x , les valeurs des lentilles pour lesquels s'observent les pics caractéristiques ne sont pas modifiés (fig. 3.22).

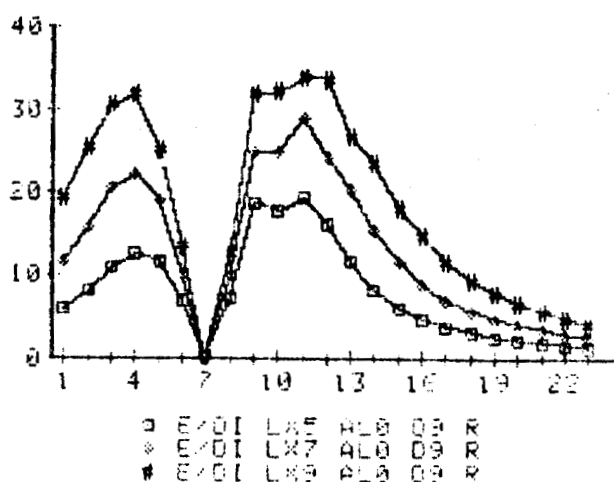


FIGURE 3.22

Par contre, une dissymétrie entre les maxima, (identique à celle étudiée pour $E=f(S_x)$) apparaît (fig. 3.23).

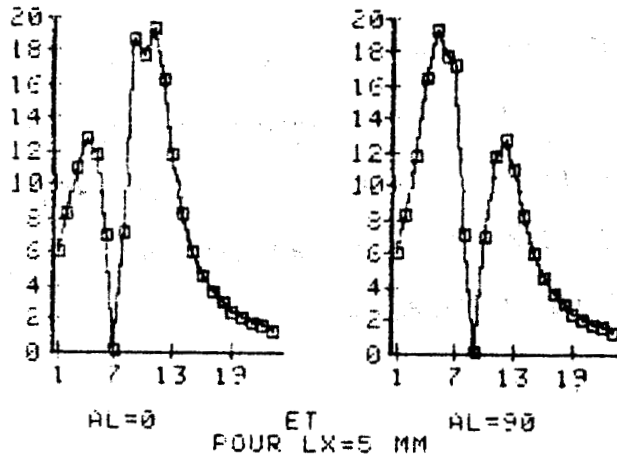


FIGURE 3.23

Rôle de la largeur Ld.

Nous avons vu (Chapitre II) que l'épaisseur du détecteur est nécessairement inférieure ou égale à l'épaisseur de la fente noire ($L_d \leq D$).

En fixant A_1 à 0° et en donnant à L_d les valeurs 3, 7 puis 9 mm tout en laissant D égal à 9 mm, nous observons une augmentation de l'amplitude des courbes en fonction de L_d (fig. 3.24).

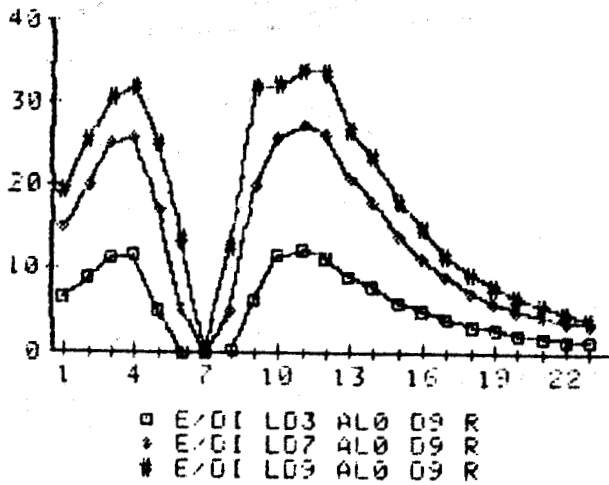


FIGURE 3.24

Lorsque $L_d=3$ mm, faible par rapport à D , trois lentilles produisent un éclaircissement nul, ce qui entraîne un manque de précision lors de l'interprétation des courbes. Par contre, l'information caractérisant le minimum est identique pour $L_d=7$ mm ou $L_d=9$ mm.

5. Diaphragme.

Nous nous sommes intéressés à la variation du diamètre pupillaire sur la qualité des résultats obtenus.

Notre simulation a été réalisée pour trois valeurs numériques (1, 5, et 13 mm), les valeurs extrêmes correspondant à des cas limites en pratique (fig. 3.25).

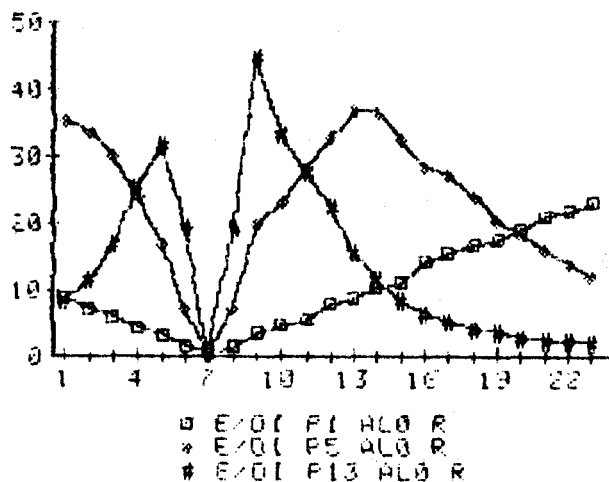


FIGURE 3.25

Une constatation primordiale est celle de l'importante variation des deux pics maximaux lorsque P décroît.

Cette même évolution est retrouvée dans les mesures

expérimentales effectuées sur banc optique (fig. 3.26).

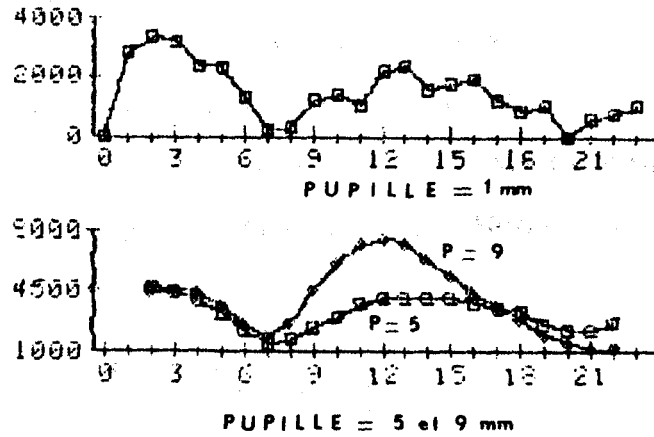


FIGURE 3.26

La courbe théorique obtenue pour $P=1$ mm (fig. 3.24) est la plus aisément interprétable du fait de sa linéarité, mais l'amplitude du signal reste faible et le rapport signal / bruit dans le cas expérimental (fig. 3.25) devient rédhibitoire, du fait des trop petits flux lumineux sortant.

En utilisant une valeur intermédiaire $P=5$ mm, la dynamique de l'éclairement reste correcte, et les pics sont suffisamment écartés pour que l'on puisse approximer la zone de faible défocalisation par une intersection de droites.

Cette identification permettra d'améliorer la précision des mesures.

6. Inclinaison du miroir.

Lors de la réalisation expérimentale, la fente sombre est inclinée à 45° par rapport au plan de la source (fig.

1.5), alors que l'inclinaison GA est nulle dans notre modèle simplifié.

Nous avons étudié les variations de l'éclairement en fonction de AL (angle de rotation dans le plan perpendiculaire au trajet lumineux), dans les deux cas limites GA=0° (théorique) et GA=45° (expérimental).

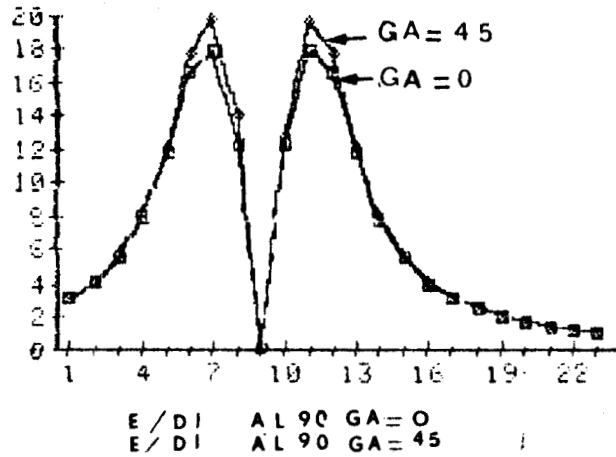


FIGURE 3.27

Dans le cas de lentilles sphériques, les variations sont négligeables, même dans le cas le plus défavorable où AL=90° et GA=45° (fig. 3.27).

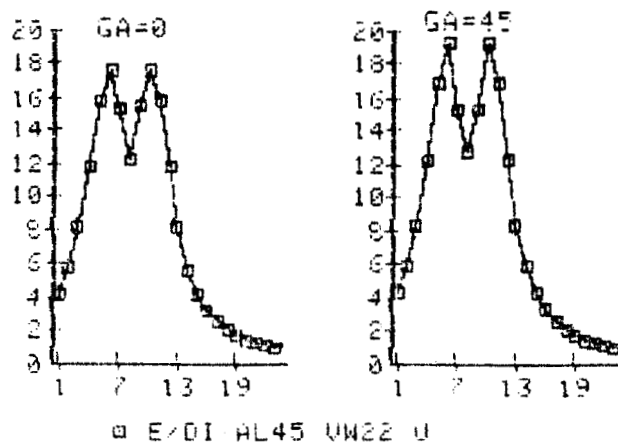


FIGURE 3.28

Lorsque la lentille inconnue est astigmatique ($V_v=20$ d et $V_w=22$ d) dans nos conditions initiales, les amplitudes des maxima et du minimum sont légèrement majorées lorsque $AL=45$ et $GA=45$ (fig. 3.28).

Ces différences, qui restent néanmoins faibles, sont dues à ce que tous les points de la fente noire ne sont plus équidistants du plan de l'écran, la défocalisation n'étant plus identique pour chacun des points. Cependant, les défocalisations les plus importantes sont celles produites par les points les plus éloignés de l'axe du miroir et qui participent peu à l'éclairement total, d'où la faible influence de la variation de ces paramètres.

7. Séparation des dioptries.

En utilisant les équations et les notations établies au Chapitre II, et en utilisant le programme spécifique décrit en Annexe IV, nous avons étudié la relation entre C_1 , puissance de la lentille d'essai, et C_2 puissance de la lentille inconnue, dans les conditions de la focalisation.

Cas du réfractomètre.

En première approximation, nous avons considéré la distance R_2 (cristallin - rétine) égale à 15 mm.

Les courbes $C_2 = f(C_1)$ représentent les différences

obtenues pour une distance entre lentilles égale à 0 et 20 mm, la distance source - lentille étant considérée égale à 333mm (fig. 3.29).

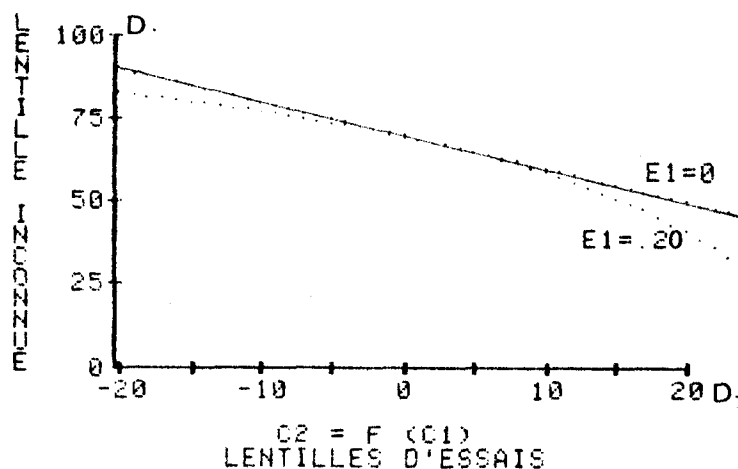


FIGURE 3.29

Pour une distance E_1 nulle (en continu sur le tracé), la courbe est linéaire. Par contre, lorsque $E_1 = 20$ mm, pour des puissances importantes de la lentille d'essai il existe une nette non linéarité.

Deux méthodes sont envisageables pour compenser cet effet:

- introduire une non linéarité inverse dans la répartition en puissance des lentilles du disque optique. Cet artifice conserve la correspondance directe entre la valeur de la puissance de la lentille connue et celle de l'oeil.

- Etablir par logiciel une correspondance entre la puissance réelle de l'oeil à partir de celle de la lentille.

Cette seconde méthode sera retenue car elle est beaucoup plus souple d'emploi, les valeurs des lentilles du disque optique étant des valeurs entières, l'extrapolation reste simple.

La dernière partie à étudier est l'erreur commise sur la distance séparant le disque optique du sommet cornéen due à la variation de positionnement de l'oeil.

Nous avons pris comme valeur numérique une distance de 20 mm, avec une variation de +/- 5 mm (fig. 3.30.).

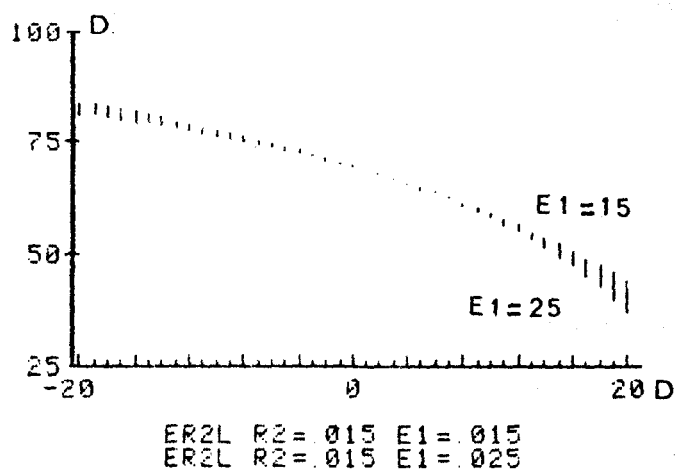


FIGURE 3.30

L'erreur maximale, obtenue pour des puissances élevées, jamais rencontrées en pratique, est de 6 dioptries. Cette incertitude est négligeable puisque dans ce cas extrême, la mesure serait de 43 +/- 3 dioptries.

Cas du frontofocomètre.

Pour effectuer le tracé de la courbe $C_2=f(C_1)$, nous avons pris une distance R_2 séparant la lentille inconnue de l'écran égale à 50 mm et $E_1=20$ mm, cette courbe étant déduite d'après un système à deux lentilles (fig. 3.31).

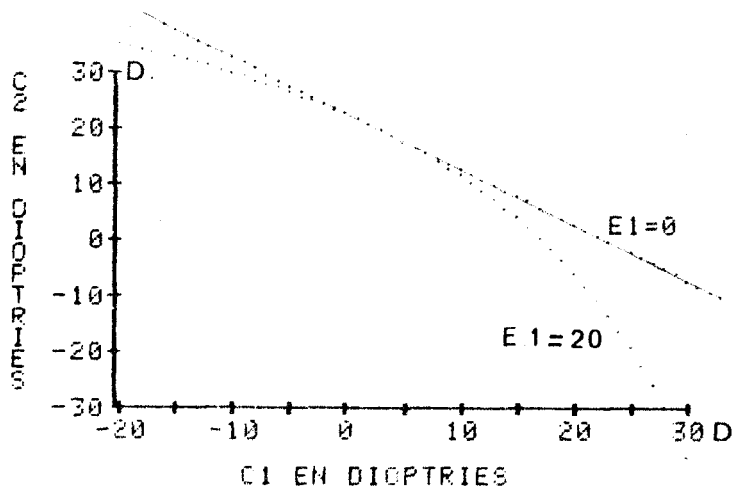
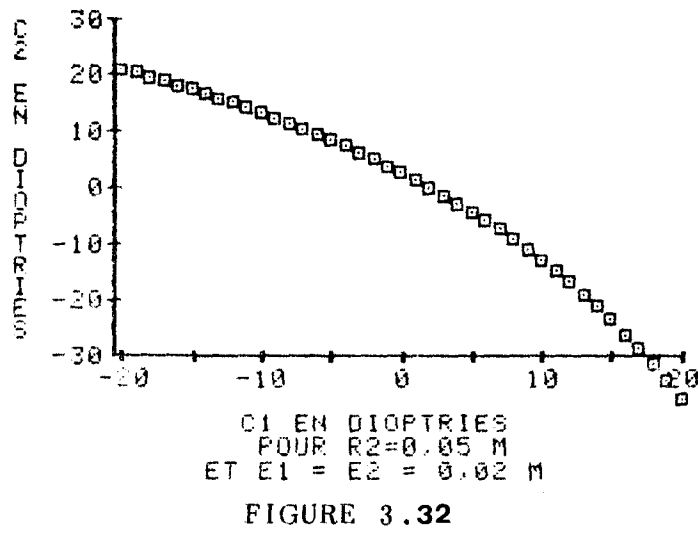


FIGURE 3.31

La mesure de lentille dans une gamme s'étendant de -25 à + 25 dioptries, est limitée par une très forte non linéarité.

Il paraît donc judicieux d'utiliser la mise en équation effectuée pour un système optique composé de trois lentilles (paragraphe II 5 B 2).

Pour $R_2 = 50$ mm et $C_3 = 20$ dioptries, avec $E_1 = E_2 = 20$ mm, la non linéarité a très nettement diminuée (fig. 3.32).



L'exploitation des résultats de notre simulation nous a permis de concevoir un appareil dont les caractéristiques optimales sont exposées au Chapitre suivant.

C H A P I T R E - I V

C O N C E P T I O N E T R E A L I S A T I O N D U S Y S T E M E .

Ce chapitre donne une synthèse des paramètres étudiés au chapitre précédent et décrit les algorithmes d'acquisition et de traitement numérique du signal reçu par le photocapteur placé sur le banc expérimental.

Nous avons mené, parallèlement aux essais sur banc optique, l'analyse des résultats théoriques donnés par la simulation.

IV.1 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES.

Les résultats de notre simulation par ordinateur nous permettent de dégager plusieurs caractéristiques optimisant l'interaction des nombreux paramètres étudiés. Notre analyse avait essentiellement pour but l'obtention d'un compromis entre l'amplitude du signal reçu par le photocapteur et l'optimisation des calculs d'interpolation.

Dans le système, deux paramètres nous sont pratiquement imposés :

a) Le diamètre pupillaire : il intervient beaucoup dans la qualité du résultat obtenu, mais dans le cas de l'utilisation en réfractomètre automatique, ce diamètre ne peut être contrôlé par le système.

Le diamètre de la pupille varie entre 2 et 8 mm, et la dilatation médicamenteuse par parasymphatolytique (atropine, mydriaticum) sera utile. L'obtention d'un diamètre de l'ordre de 5 mm pourra ainsi être obtenu, ce qui justifie notre choix lors de la simulation.

En frontofocomètre, nous ne sommes pas limités par l'intensité lumineuse dirigée vers la lentille à étudier. L'optimum sera déterminé en fonction du type de phototransistor employé, de la source lumineuse et de la surface de la lentille sur laquelle nous désirons effectuer la mesure.

b) Le nombre de fentes sombres : il n'est pas nécessaire d'en utiliser plusieurs, une seule suffit et permet d'obtenir une bonne dynamique du signal, tout en

simplifiant la réalisation.

Nous pouvons par contre déduire de notre étude les caractéristiques géométriques et les dimensions relatives optimales de l'ensemble source - détecteur.

La distance écran - lentille est imposée par les dimensions de l'oeil. La distance source - lentille est par contre donnée par le mode de réalisation du prototype. Arbitrairement, nous nous sommes fixés respectivement des valeurs de 15 mm et 333 mm.

L'écart entre maxima et l'amplitude du signal peuvent être modifiés par changement de structure de la source.

Deux choix sont possibles :

- Augmenter les dimensions de la zone lumineuse et accroître ainsi la dynamique du signal. Cette méthode n'a pas été retenue car l'écartement important des maxima rend difficile la vérification du type de courbes, et l'on ne peut plus isoler le minimum en se basant sur la variation rapide de la dérivée.

- Imposer une valeur moyenne de l'écartement des maxima. Pour obtenir une interpolation aisée du vrai minimum, nous avons fixé expérimentalement une "valeur de défocalisation" V_d de trois dioptries, suffisante pour nos calculs (fig. 4.1).

Cette valeur est justifiée en tenant compte de la précision attendue de 0,25 dioptries. Pour une valeur plus faible (V_d égale à 1 ou 2 dioptries), l'extrapolation n'est plus possible. Si un des points entourant le minimum est

fortement entaché d'erreur, le résultat est erroné. En prenant V_d supérieur à 3, le problème de la reconnaissance de la courbe est de nouveau rencontré.

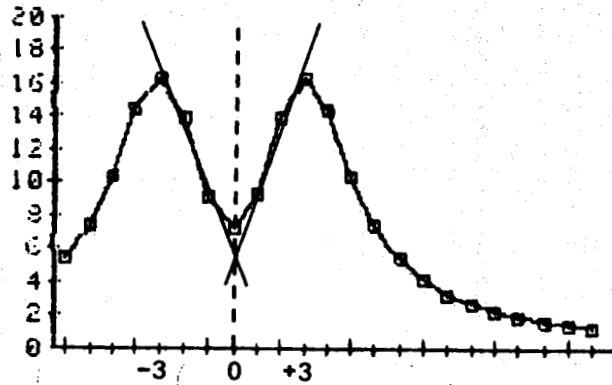


FIGURE 4.1

Le rayon R de la tache (dans le cas du stigmatisme), dépend du diamètre pupillaire (imposé), que nous avons fixé à une valeur moyenne de 5 mm, et de la puissance du bloc optique (dioptrie de l'oeil : 67 dioptries; lentilles d'essai: imposées par construction).

Ces paramètres étant fixés (arbitrairement ou correspondant à des valeurs moyennes), le rayon R de la tache est connu (fig. 4.2).

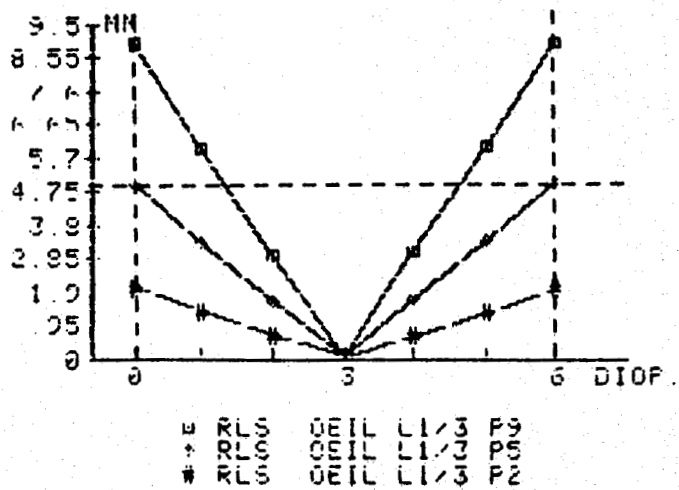


FIGURE 4.2

Les caractéristiques de la source (fig. 4.3) sont alors déduites de notre simulation.

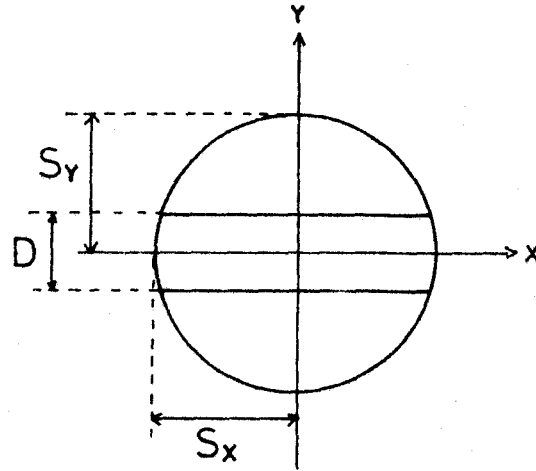


FIGURE 4.3

Pour limiter les différences d'amplitude et de position des maxima dans l'étude de l'astigmatisme, on utilisera une source lumineuse à symétrie axiale ($S_x=S_y$; page 70) et on imposera la largeur de la fente égale au rayon R de la tache ($D=R$). Dans ces conditions, l'interpolation linéaire devient parfaitement justifiée. En effet, les deux maxima ont alors des positions symétriques de part et d'autre du minimum (fig. 4.4, equ. 3.1).

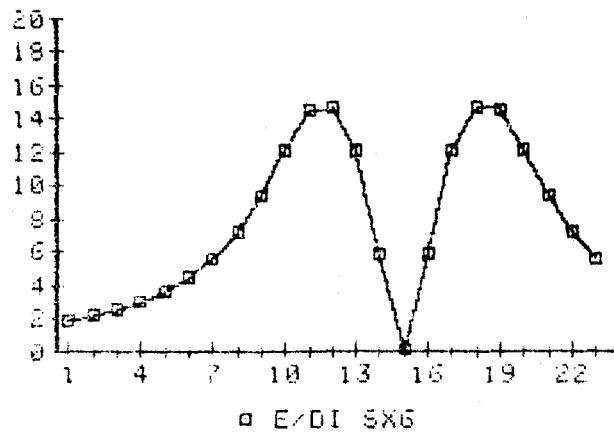


FIGURE 4.4

Un exemple de ce type d'interpolation est donnée ci - dessous (fig. 4.5).

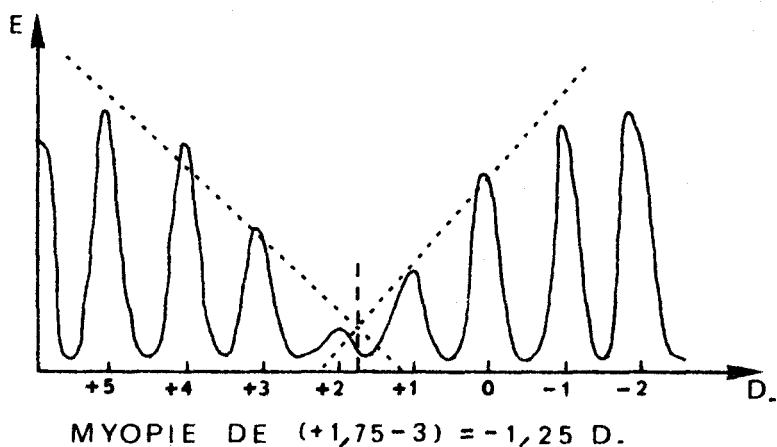


FIGURE 4.5

La largeur L_d du détecteur (miroir) doit être égale à celle de la fente noire pour éviter une perte d'information lors des faibles défocalisations ($L_d=D$; page 77). Lorsque le miroir est incliné de 45° par rapport à l'axe optique, le miroir doit traverser totalement le faisceau lumineux ($L_x=2.S_x/\sin 45^\circ$).

Pour déterminer le rayon S_x de la source lumineuse qui permet, dans ces conditions, d'observer une défocalisation des maxima de trois dioptries, il nous suffit d'effectuer le tracé de l'éclairement en fonction des lentilles d'essai, en utilisant S_x comme paramètre.

Différentes valeurs (exprimées en mm) sont indiquées dans le tableau suivant :

DISTANCE S - L	: 333	: 200	: 100
=====			
RAYON TACHE	: 5	: 3	: 1.6
SX = SY	: 6	: 4.5	: 2.4
D = LD	: 5	: 3	: 1.6
LX	: 8.5	: 6.5	: 3.5
DISQUE	: -15 A 21	: -13 A 23	: -8 A 28

Les puissances des lentilles du disque optique (exprimées en dioptries), correspondent à la gamme dans laquelle doivent s'échelonner ces lentilles pour pouvoir mesurer la puissance d'un oeil compris entre -15 et +15 dioptries (suffisant pour l'examen clinique courant), sachant :

- qu'il y a une perte d'information correspondant à 3 dioptries pour chaque extrémités de la courbe.

- que la puissance R de l'oeil en fonction de la puissance V de la lentille d'essai est donnée par

$$R = V - \frac{1}{L}$$

avec L la distance séparant l'écran du sommet cornéen.

IV.2 OPTIMISATION DU TEMPS D'ACQUISITION.

La quantification d'un astigmatisme est obtenue par la détermination de la puissance suivant les différents axes.

Deux méthodes sont possibles dans la manière de mesurer la puissance en fonction d'un axe.

a) La première consiste, par une rotation rapide du

disque optique, à évaluer la puissance globale de l'oeil. En calant ensuite le disque sur la lentille provoquant le minimum d'éclairement, on détermine les axes focaux par rotation du miroir .

Puis, par blocage du miroir dans la position correspondant aux deux axes, leurs focales sont mesurées par une nouvelle rotation du disque optique.

Cette technique à l'avantage d'offrir une grande rapidité de travail. Par contre nous sommes contraints d'utiliser un moteur pas-à-pas à grand couple pour entraîner le disque optique, celui - ci n'étant pas de masse négligeable.

De plus, la précision sur la position des axes principaux est directement liée au nombre de pas du moteur commandant le miroir, aucune extrapolation n'étant possible.

b) Une seconde méthode consiste à effectuer simultanément la rotation du disque optique et celle du miroir, en synchronisant l'ensemble. Nous mesurons ainsi la puissance suivant tous les axes imposés par le miroir.

De cette manière, la mesure est plus longue à effectuer, mais permet d'obtenir une redondance dans les acquisitions (le miroir prend deux fois la même position après rotation de 180°) et facilite ainsi une constante vérification des résultats. Entre deux pas du miroir, il ne peut y avoir une grande différence de puissance, et entre deux lentilles successives du disque optique, le signal ne varie que faiblement.

Un simple moteur à courant continu est nécessaire à la mise en rotation du disque optique, et permet d'obtenir de grandes vitesses.

Pour ces raisons, nous avons choisi cette seconde méthode pour notre montage expérimental.

Optimisation des rotations.

Le temps de conversion analogique numérique de la carte d'acquisition utilisée actuellement est de 29 micro-secondes, cette rapidité est amplement suffisante pour le travail à effectuer, la limite principale est due à la vitesse de rotation du disque optique.

Un seul indexe (A) nous sert à déterminer la lentille de référence (fig. 4.7): toute la périphérie du disque est utilisée.

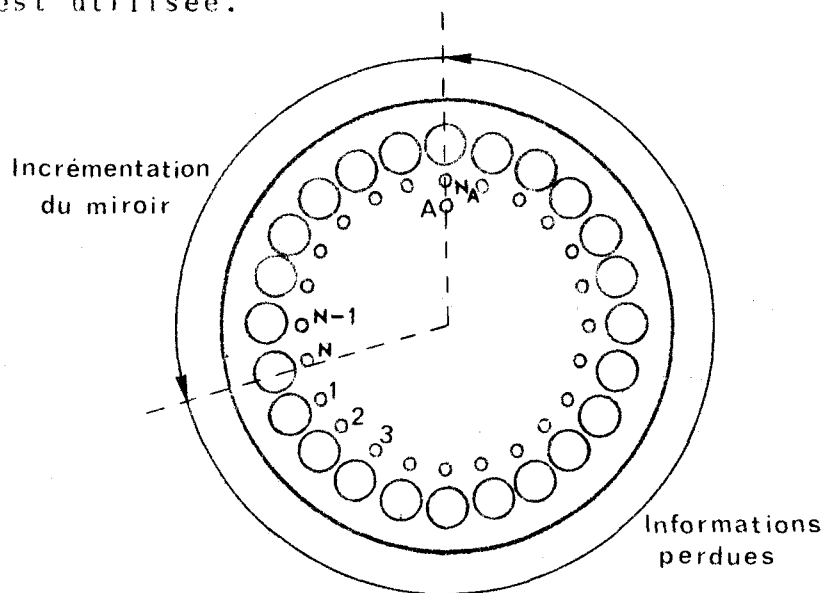


FIGURE 4.7

La durée nécessaire pour incrémenter deux positions successives du miroir correspond au défilement de plusieurs lentilles du disque optique, le nombre de lentilles n'étant pas forcément constant, du fait des fluctuations de la vitesse du moteur à courant continu.

Si nous attendons de nouveau un passage du repère (A), nous perdons toutes les informations jusqu'à ce que (A) revienne à sa position d'origine.

Pour éviter cette attente, nous avons fait débiter les acquisitions sur chaque lentille indexée (1, 2, ..., N) dans l'ordre où elles se présentent, dès la stabilisation du miroir.

Le numéro N_a de la lentille correspondant au repère, permet par logiciel une remise en ordre des différentes valeurs de l'acquisition. Par translation, tout se passe comme si l'acquisition débutait par la première lentille après le repère, sans attendre le passage de celui-ci.

Le temps global de l'acquisition et de traitement est diminué en utilisant les possibilités Interruption Si Demandée (IRQ) et Interruption Non Masquable (NMI) qu'offre le micro - processeur. Celui-ci organise sa mémoire adressable et commence les calculs nécessaires à l'analyse, n'effectuant l'acquisition sur une lentille que s'il y a IRQ provoqué par passage de l'indexe correspondant.

- détection du trou de synchronisation N_a sur IRQ.

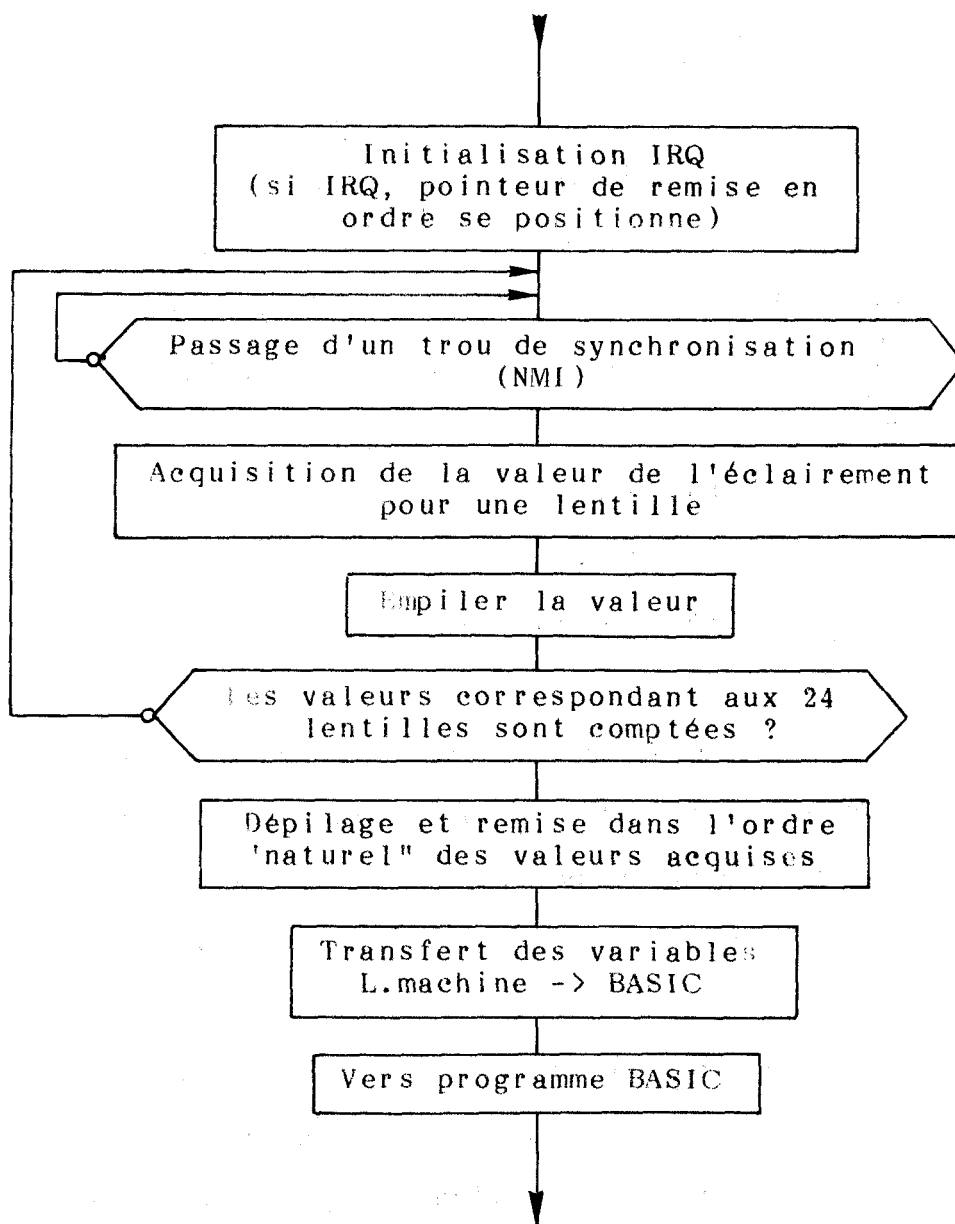
- acquisition d'une valeur de l'éclairement par NMI.

Tout conflit, résultant du passage simultané des deux

indexes correspondant à la synchronisation et à la lentille, est évité en décalant légèrement le cavalier supportant la photodiode du trou de synchronisation Na.

Le programme chargé de l'acquisitions des valeurs de l'éclairement du photocapteur est écrit dans le langage machine du 6502.

Son organigramme est présentée ci-dessous et son listing donné en annexe 5.



VI.3 TRAITEMENT DES ACQUISITIONS.

La vitesse de traitement n'ayant pas une grande importance pour la mise au point, nous avons écrit le programme en BASIC. Ce langage peu structuré, permettra une transposition rapide en langage machine lors de la réalisation définitive.

IV.3.1 Organisation.

Après la phase d'initialisation du système qui définit les dimensions des tableaux de variables utilisés par les routines ainsi que les constantes attribuées aux paramètres, le menu propose à l'utilisateur trois options:

- Directe.
- Mémoires.
- Intermediaires.

a) L'option "directe" effectue directement l'acquisition sur le banc expérimental à l'aide du programme décrit au paragraphe précédent, et traite l'ensemble des mesures, pour aboutir à la détermination de l'astigmatisme

Deux fichiers sont créés et mémorisés sur disquette:

- valeurs brutes des acquisitions.
- puissances calculées pour chaque position du miroir.

b) L'option "mémorisées" recherche les valeurs brutes mémorisées sur disquette et poursuit les calculs comme dans le programme précédent.

c) L'option "intermédiaire" permet la recherche du fichier puissances calculées pour chaque position du miroir et continue les calculs de détermination de l'astigmatisme.

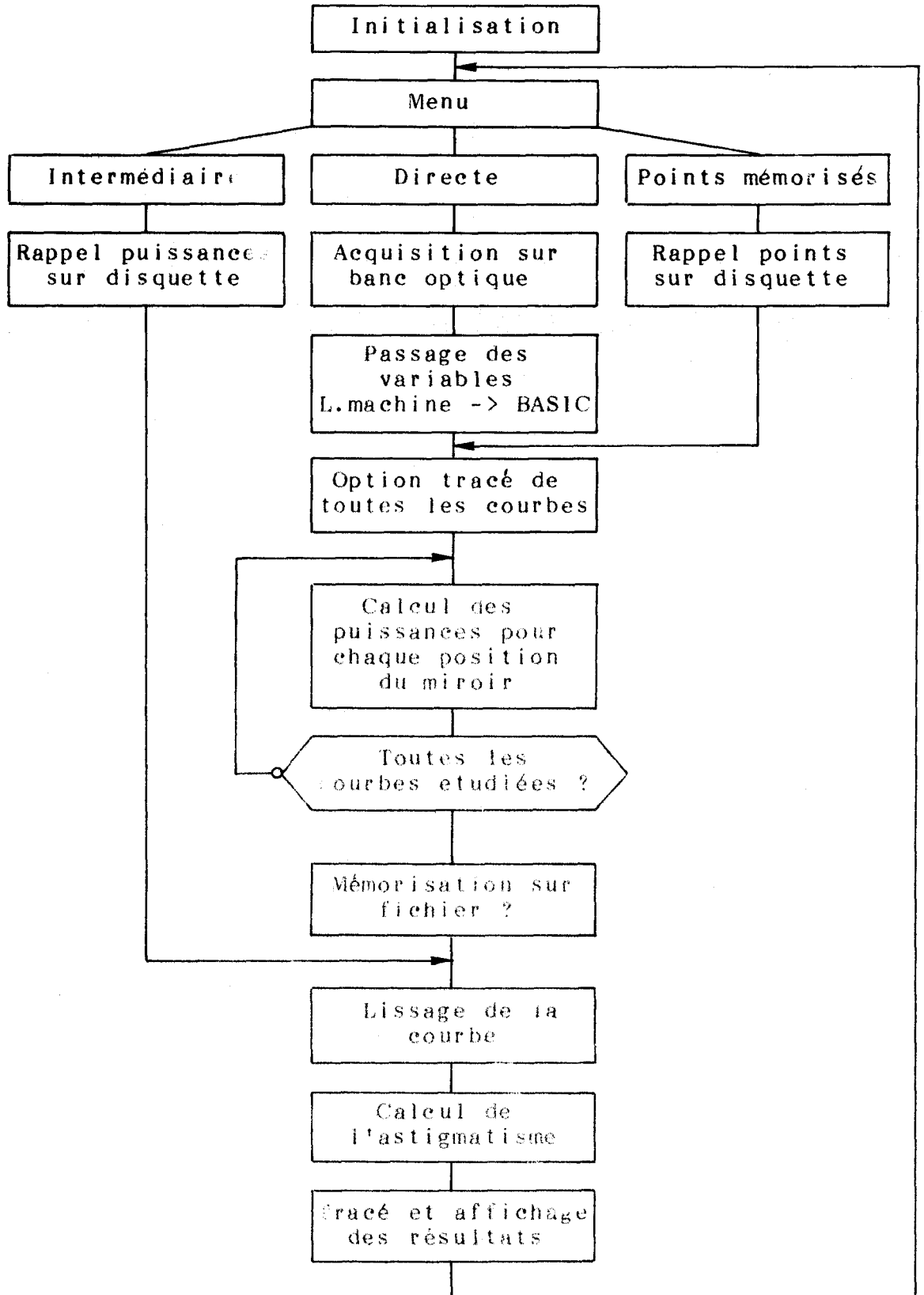
Ces deux dernières options ne sont qu'une facilité pour la mise au point, ce qui permet de reprendre plusieurs fois la même série et d'étudier le programme en des points particuliers.

Nous allons traiter successivement les trois principales tâches du programme:

- Calcul des puissances de la lentille inconnue pour chaque position du miroir.
- Filtrage de la courbe des puissances.
- Détermination de l'astigmatisme.

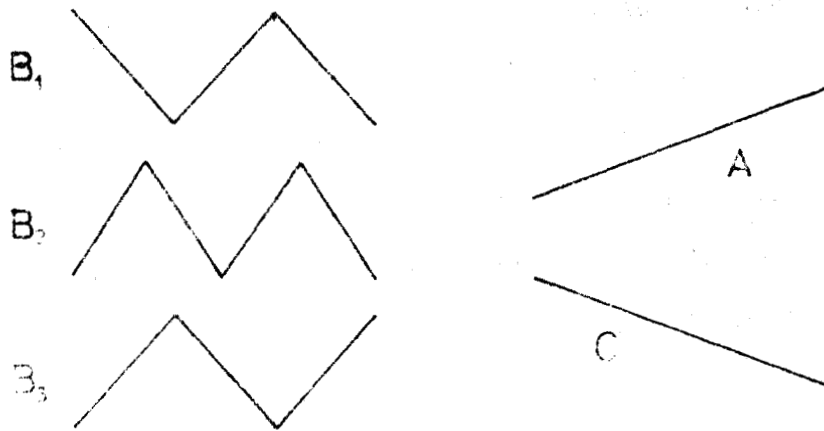


ORGANIGRAMME GENERAL :



IV.3.2 Calcul des puissances.

De façon schématique, cinq types de courbes (éclairage fonction des lentilles du disque optique), représentant trois classes de figures sont possibles:



La classe B illustre les cas où le minimum est correctement représenté, avec un ou deux maxima. La valeur du minimum peut être correctement établie.

Les classes A et C nous permettent seulement de dire que le minimum est inférieur ou supérieur à une certaine valeur, sans pouvoir le déterminer.

Un second point à noter dans ce type d'analyse est l'importance que revêt les perturbations du signal reçu au niveau du photocapteur.

Le petit nombre d'acquisitions pour chaque position du miroir (24 dans le cas du montage expérimental), et le

fait que le mesurer la distribution du bruit n'est pas connue, nous oblige à utiliser une méthode de recherche du minimum basée sur l'observation empiriques et sur les résultats de notre simulation.

Dans une première étape, nous pensions utiliser un modèle mathématique et identifier la courbe expérimentale à ce modèle théorique.

Malgré la simplicité des courbes étudiées, le nombre important de paramètres à connaître accroît fortement la taille du programme, le rendant incompatible pour l'application envisagée.

La méthode que nous avons employée, consiste à utiliser les variations de la dérivée de la courbe.

La simulation nous a montré que nous pouvions approximer le voisinage du minimum par l'intersection de deux segments de droites. Un calcul de dérivée par segmentations successives est donc possible (C.VASSEUR Annexe 2).

Cette méthode nous fournit un système d'équations récurrentes très facilement implantables sur micro - processeurs :

$$C_{n+1} = C_n + D_n$$

$$M_{n+1} = M_n - C_{n+q}.S_n + Y_{n+1}$$

$$\text{où } D_n = Y_{n+q+1} - Y_{n-q}$$

$$\text{et } S_n = Y_{n+q+1} + Y_{n-q}$$

Y : coordonnées des points étudiés.

C : dérivée.

M : pentes de la courbe.

A ce stade, le problème posé est la détermination du nombre de points ($2d + 1$) que doit avoir le segment de droite.

Si ce nombre est trop grand, il n'est plus possible de calculer la dérivée pour les points extrêmes de la courbe.

Par contre, en prenant ce nombre petit ($d = 1$), les variations de la courbe sont suivies trop précisément. Il est difficile alors de déterminer le bon minimum des minima relatifs correspondant à des artefacts dus au bruit.

Nous avons contourné le problème par une approche successive du bon minimum.

Dans un premier temps, le programme calcule les dérivées pour d élevé ($d=4$) de manière à repérer le type de courbe (A, B ou C) et à localiser l'emplacement approximatif du minimum.

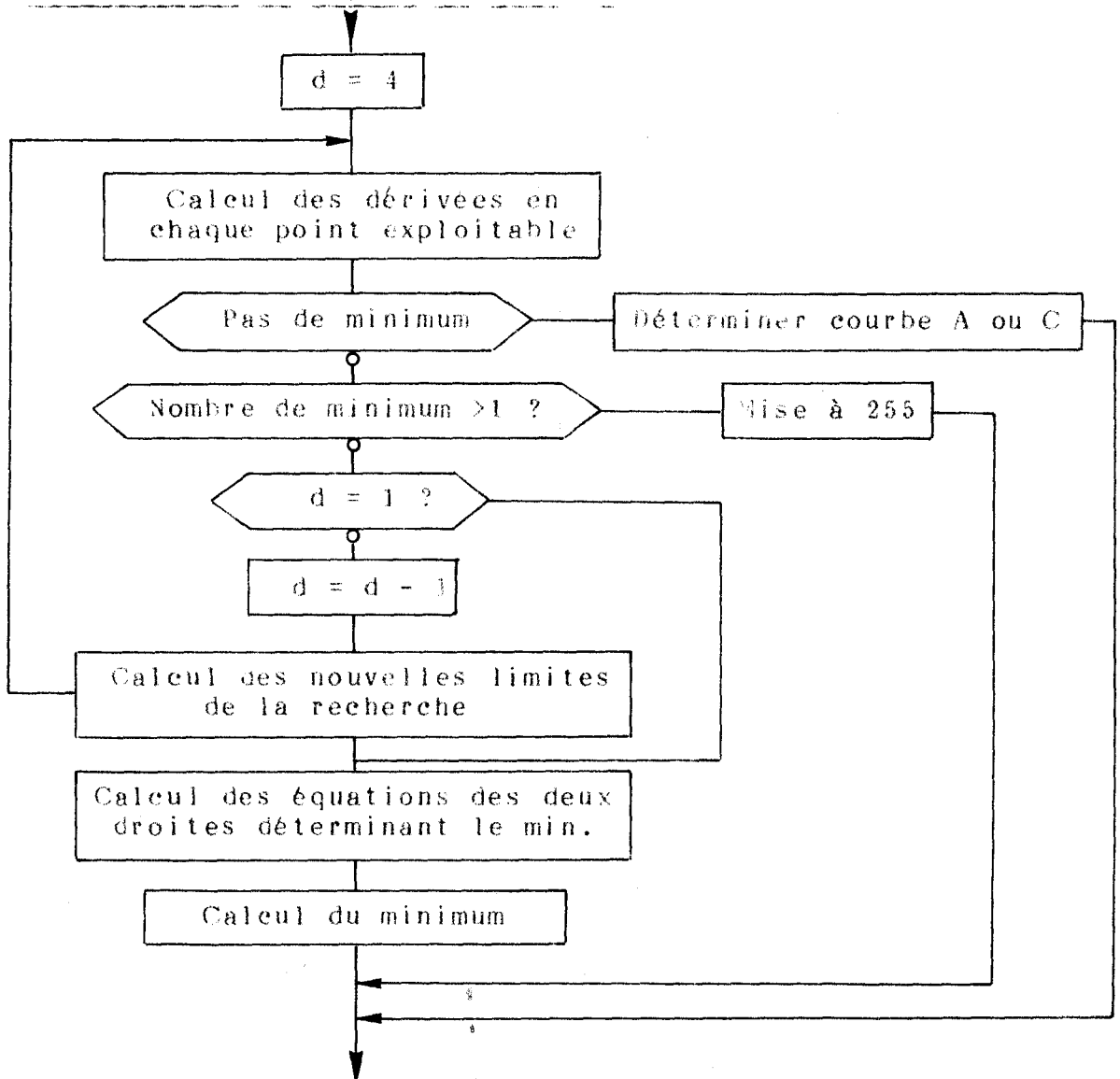
Puis, par itérations successives, en diminuant la valeur de d jusqu'à 1, le programme affine la détermination des points de la courbe qui correspondent au voisinage du minimum.

Un simple calcul par la méthode des moindres carrés

des deux droites situées de part et d'autre de ces points permet, grâce à leur intersection de donner la valeur précise du minimum.

Tout au long de cette recherche, le programme effectue une succession de tests qui permettent d'éliminer les courbes douteuses (pas de minimum, existances de deux minimum, incohérences dans les résultats). Si une erreur est détectée, la puissance est alors notée 255, ce qui permet de retrouver rapidement l'erreur dans le tableau de mesure.

ORGANIGRAMME DU CALCUL DU MINIMUM



IV.3.3 Filtrage.

Lorsque les puissances de la lentille inconnue suivant chaque position du miroir sont déterminées, le programme élimine les valeurs aberrantes.

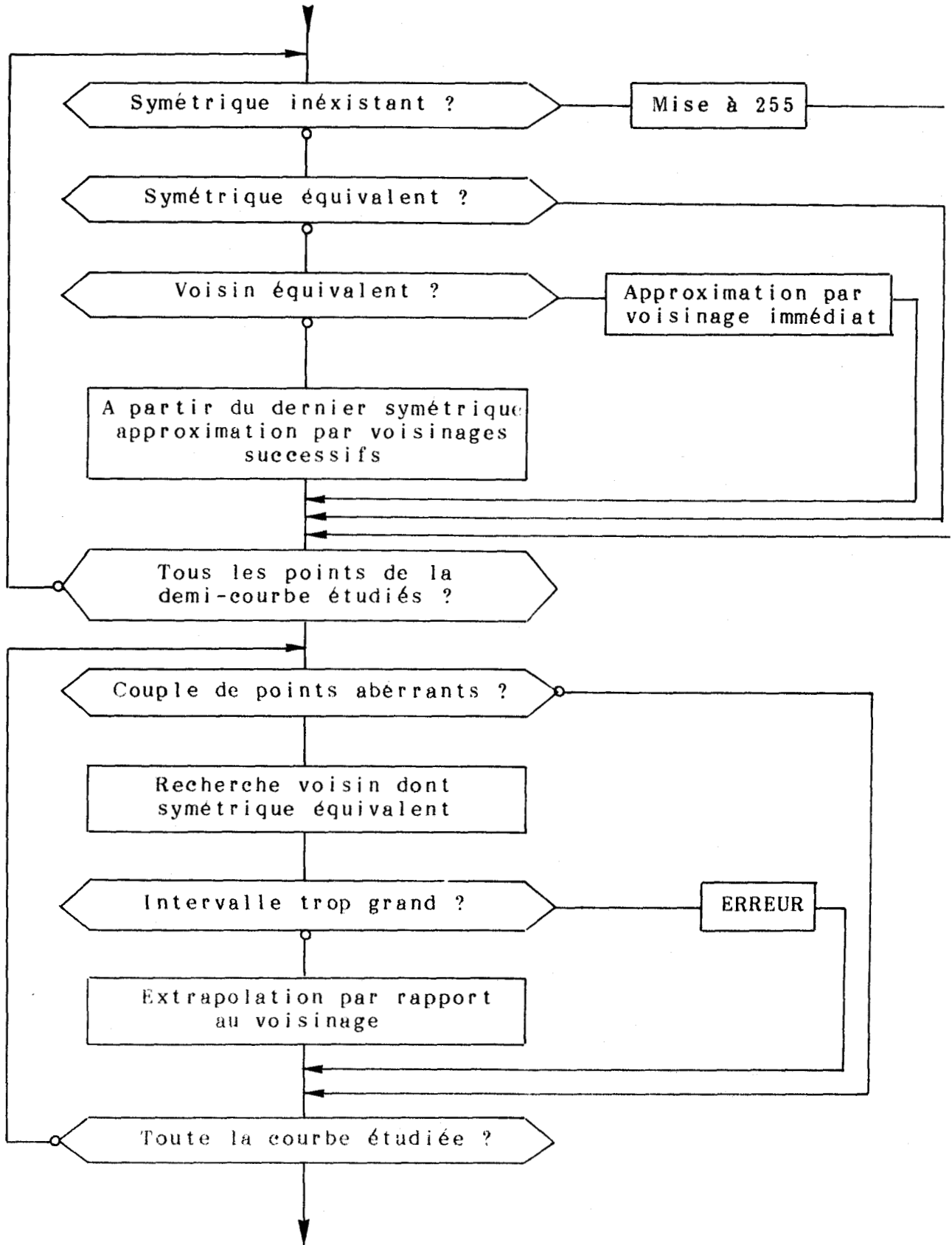
La redondance des mesures est alors très utile. Pour chaque position du miroir, une rotation de 180° détermine une géométrie de la source identique, donc des puissances calculées identiques. Nous appellerons ces deux puissances "symétriques".

D'autre part, les puissances successives doivent varier progressivement, sans discontinuités importantes.

En partant de ces deux remarques, les points aberrants sont localisés et remplacés par leur symétrique si ce dernier est correct, ou par un point déduit par extrapolation des points voisins.

Pour terminer l'analyse de la courbe initiale, le programme effectue la correction de la puissance en fonction de la distance entre les dioptries, conformément aux résultats de notre étude (paragraphe II 5 B).

ORGANIGRAMME FILTRAGE :



IV.3.4 Détermination de l'astigmatisme.

1. Méthode.

La dernière étape consiste à calculer l'astigmatisme de l'oeil ou de la lentille inconnue, et de déterminer la position des axes.

Dans cette analyse, notre intérêt se portera sur l'astigmatisme régulier, en admettant les focales principales perpendiculaires.

Vers 1920, LAURANCE (réf.15) a montré que, si un dioptré cylindrique (fig. 4.8) a une puissance C , sa puissance suivant une direction faisant un angle T avec son axe est (moyennant certaines approximations) donnée par la formule simple:

$$M(T) = C \cdot \sin^2 T$$

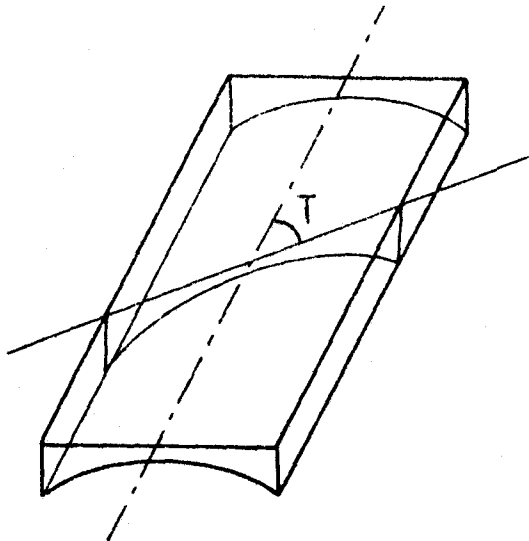


FIGURE 4.8

Nous pouvons considérer une lentille astigmatique comme

composée d'une lentille sphérique de puissance S, et d'une lentille cylindrique axée sur une des focales principales.

La puissance de la lentille astigmatique sera alors:

$$M(T) = S + C.\sin^2 T$$

En prenant pour origine un méridien choisi pour une position privilégiée du miroir, une identification de la courbe expérimentale avec le modèle théorique défini ci-dessus, fournit la puissance S de la lentille sphérique, la puissance C du cylindre (négative par convention) et l'angle TE que fait l'axe de ce cylindre avec le méridien origine.

Ce problème revient à l'identification de la courbe expérimentale par un polynôme trigonométrique. La méthode la plus simple est une identification par les coefficients de Fourier pour le premier harmonique.

La méthode que nous avons utilisée a été développée par G.Goertzel (Nowakowski, ref.22), et est présentée en annexe 3.

Cette méthode numérique ne nécessite aucun calcul de fonctions trigonométriques.

Les premiers coefficients du développement de Fourier sont donnés par:

$$A(1) = \frac{2}{2n+1} (F_0 + C_1.U_1 - U_{m+2})$$

$$B(1) = \frac{2}{2n+1} S_1.U_1$$

A1 étant le terme impair et B1 le terme pair du

développement.

U_m est déterminée par la récurrence

$$U_m = F_m + 2.C1.U_{m+1} - U_{m+2}$$

pour m variant de $2n$ à 0 par pas de -1 , avec les conditions initiales

$$U_{2n+2} = 0 \text{ et } U_{2n+1} = 0$$

où F_m est l'ordonnée du point de la courbe d'abscisse m et

$$S1 = \sin \left(\frac{2.Pi}{2n+1} \right) \quad C1 = \cos \left(\frac{2.Pi}{2n+1} \right)$$

Le nombre de point de la courbe est $2n+1$. Dans notre cas, ce nombre ne variant pas, n est une constant ainsi que $S1$ et $C1$.

2) Identification des coefficients.

Avec nos notations, le modèle est décrit par

$$M(Te) = S + C.\sin^2(A1 + Te)$$

où $A1$ représente l'angle que forme l'axe du cylindre avec le méridien origine, ce qui donne

$$M(Te) = S + C.\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos 2.(A1 + Te)\right)$$

$$= S + \frac{C}{2} - \frac{C}{2}.\cos 2.(A1 + Te)$$

de la forme

$$M(Te) = A1 + B1.\cos 2(A1 + Te) \quad (3.1)$$

$$= A1 + B1.(\cos 2.A1 * \cos 2.Te - \sin 2.A1 * \sin 2.Te)$$

avec
$$A1 = S + \frac{C}{2}$$

$$B1 = - \frac{C}{2}$$

et l'on en déduit

$$\begin{aligned} C &= - 2.B1 \\ S &= A1 + B1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Le premier harmonique de la transformée de Fourier s'écrit

$$M(Te) = \frac{A(0)}{2} + A(1).\cos (Te) + B(1).\sin (Te) \quad (3.3)$$

En comparant les équations (3.1) et (3.3), nous obtenons

$$A(0) = 2.A1$$

$$A(1) = B1.\cos 2.A1$$

$$B(1) = - B1 \sin 2.A1$$

on en déduit $\tan (2.A1) = B(1) / A(1)$

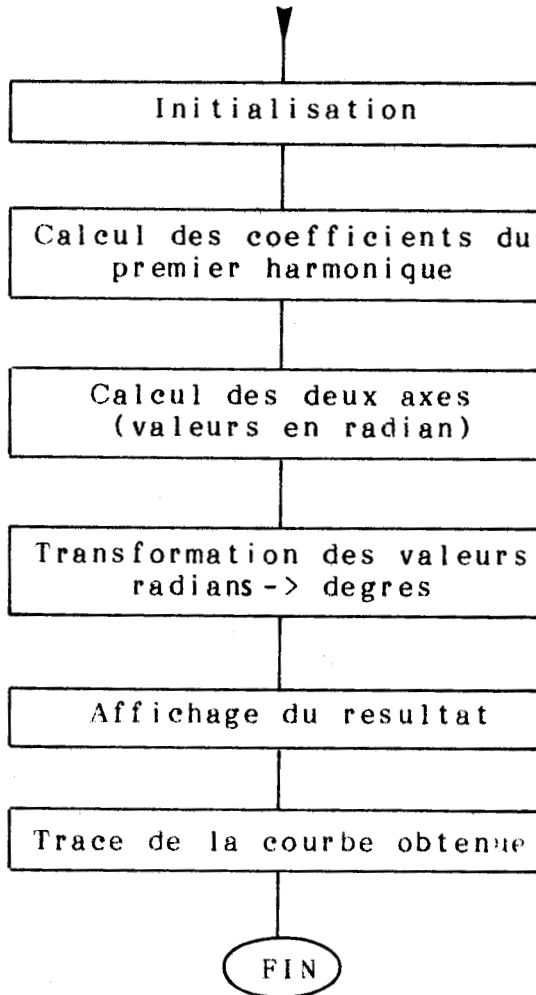
$$\text{soit } A1 = \frac{1}{2} \operatorname{Atn} \frac{B(1)}{A(1)}$$

$$B1 = \frac{A(1)}{\cos 2.A1}$$

Après avoir calculé ces différents coefficients et en utilisant le système d'équations (3.2), les caractéristiques optiques de l'oeil sont parfaitement déterminées.

Il ne reste plus qu'à tracer le graphique correspondant aux puissances de l'oeil pour chaque position du miroir, de représenter les axes de l'astigmatisme et d'afficher le résultat de la mesure sous la forme convenant le mieux au praticien.

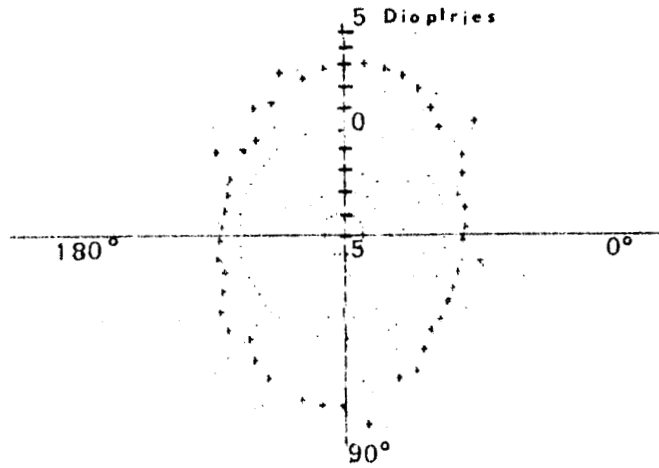
ORGANIGRAMME DU CALCUL DE L'ASTIGMATISME :



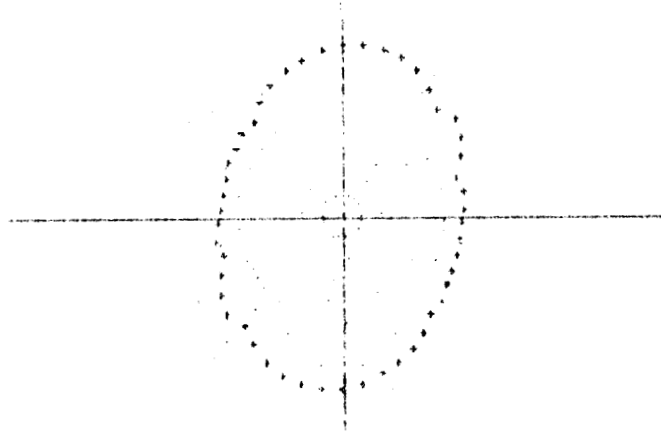
IV.4 RESULTATS.

Nous présentons un exemple du traitement effectuée sur une série d'acquisition:

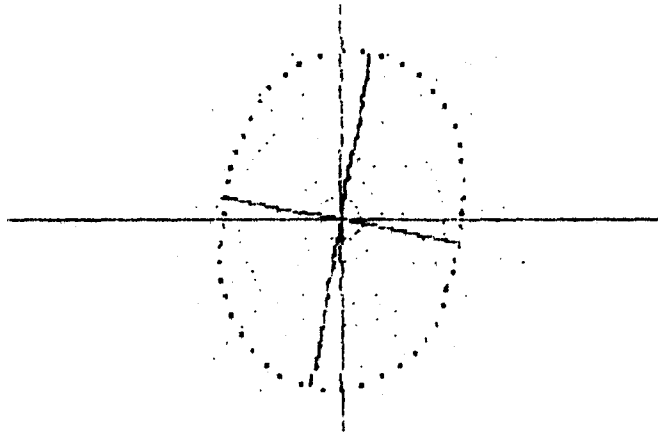
a) Courbe brute obtenue par acquisition sur le banc expérimental.



b) Après filtrage des valeurs aberrantes.



c) Application du modèle théorique.



Les résultats annoncés par le calculateur sont:

- puissance de la lentille sphérique $S : 2,9$ dioptries.
 - puissance de la lentille cylindrique $C : -2,2$ dioptries.
 - position de la focale de plus grande puissance : 100° .
- pour des lentilles de puissances réelles $S=0,75$ et $C=2,25$ dioptries.

La précision obtenue correspond bien à celle définie dans le cahier des charges de notre système.

C O N C L U S I O N

L'emploi de plus en plus fréquent de la micro-informatique dans les systèmes d'acquisition de mesures et de commandes de processus, permet de développer de nouveaux systèmes de réfractomètres automatiques.

Notre système, par la simplicité de l'optique, de la mécanique et de l'informatique utilisées, doit conduire à un appareil d'encombrement réduit et de coût minimum.

La réalisation expérimentale actuelle autorise une précision d'un quart de dioptrie sur les puissances sphériques et cylindriques, pour une gamme s'étendant de -12 à + 8 dioptries. La précision de la mesure des axes est inférieure à 3°6.

Une des caractéristiques les plus performantes de notre système est la rapidité de l'examen, le temps d'acquisition de toutes les mesures étant de l'ordre de cinq dixièmes de seconde. On imagine aisement l'intérêt d'une telle réalisation lors de l'étude de la vision chez l'enfant ou chez des malades en mauvaises conditions.

L'analyse automatique des résultats par le micro-calculateur fourni directement au praticien toutes les valeurs dont il a besoin pour déterminer les caractéristiques de la lentille requise pour la correction de l'oeil.

La construction du prototype doit inclure plusieurs améliorations.

La gamme des mesures possibles peut être aisément agrandie par augmentation du nombre de lentilles placées sur la périphérie du disque optique.

Notre étude a été développée en utilisant une lumière blanche. L'utilisation de rayonnement infra - rouge serait souhaitable, en raison du spectre moins étendu et de la réflexion plus importante sur les structures rétiniennes.

Les performances obtenues l'ont été avec une réalisation assez rudimentaire. Une plus grande rigidité mécanique de l'ensemble et un traitement anti - reflets des lentilles d'essai réduirait de façon importante les perturbations observées sur les courbes, et améliorerait notablement la qualité du résultat.

Le traitement en différé dure actuellement plusieurs minutes, cette durée peut être considérablement réduite en utilisant le langage machine.

Nous n'avons pas abordé les problèmes de l'astigmatisme irrégulier, beaucoup plus rare, lié le plus souvent à une anomalie cornéenne malformative ou cicatricielle. La représentation sous forme graphique, des puissances sur un nombre important d'axes, permet une visualisation immédiate de ces défauts complexes.

La précision, suffisante pour la correction de

l'oeil, est insuffisante pour la mesure des lentilles de haute qualités, au moins dans notre système tel qu'il est construit actuellement.

Pour cette étude, la suite logique de notre travail, doit nécessairement passer par la recherche d'algorithmes améliorant cette précision.

Se pose alors le problème de l'étude des lentilles multifocales ou à variations progressive de puissance, et de leur centrage par rapport à l'axe optique.

BIBLIOGRAPHIE

1. SERVANT M.
Etude et réalisation d'un dispositif de refractometrie
automatique applicable à l'enfant.
These 3eme cycle. Universite Lille I.
2. GREMY F. et PERRIN J.
Elements de biophysique
(tome 2) Flammarion.
3. GRAVES P.M.
Cours d'optique physiologique et d'optométrie.
(tome 3) Ed. Scientifiques Riber.
4. LEGRAND Y.
Optique physiologique (tome 1) - La dioptrique de l'oeil
et sa correction - La revue d'optique.
5. DEVORE et ANNEQUIN
Cours de physique optique. Tome I.
Vuibert.
6. MARECHAL A. et FRANCON M.
Diffraction, structure des images.
Masson et Cie.
7. SARAUX H. et Al.
Optique medicale pratique.
Doin.
8. SARAUX H. et BIAIS B.
Physiologie oculaire
Masson et Cie.
9. LUYCKX J.
Composantes optiques de l'oeil du nouveau-ne,
Archives opht., Paris 1966, 26, 159.171.
10. WARREN J. SMITH
Modern optical engeneering. The design optical systems.
M.Graw Hill Book Company 1966.
11. JULOU J.
Un procede simple de skiascopie.
Bull. des Soc. Opht. de France, S O P N1 1961.
12. DRANCE S.M., MITCHELL D.W.A., SCHULZER M.
Studies of an automatic refraction machine.
Canad. J. Ophtalmol., 10, 462, 1975.
13. DYSON C.H.
A clinical study of the autorefractor, an automatic
refracting device.
Canad. J. Ophtalmol., 12, 29, 1977.
14. GUYTON D.L.
Automated refraction.
Invest. Ophtalmol., nov., 814.818, 1974.

15. ROSENGREN B.
A method of skiascopy with the electric ophthalmoscope.
Acta Ophthalm., 1937, 15, 501, 1948, 26.
16. COLLINS G.
The electronic refractionometer.
Brit. J. Physiol. Optics, 1937, 11, 30-42.
17. DUKE ELDER S.
System of Ophthalmology.
Kimpton, London, 1962, 7, 290.
18. LANG M.M.
Automated instrumentation for the examination of the eye.
Austr. J. Optom., 1974, 57, 335-345.
19. CAMBELL F.W. and ROBSON J.G.
High speed infrared optometer.
J. Opt. Soc. Am. 1959, 49, 268.272
20. TOM N., CORNSWEET Ph.D.
Computer assisted automated refraction.
Opt. J. Rev. Optom. 1973, 6, Vol. 110,2.
21. Charlier J., MARAIS B.
A versatile data acquisition system for the
Apple microcomputer.
ITBM, Lille, 1981.
22. VASSEUR C., COUVREUR M.
New concepts for a microprocessor oriented long term
intelligent monitoring of newborns.
J. Biomed. Engeneering 1980, Vol. 2, July.
23. BELLANGER M.
Traitement numérique du signal.
Ed. Masson 1981.
24. NOWAKOWSKI C.
Méthodes de calcul numérique.
Tome 2. Ed. du P.S.I. 1983
25. PICIMBONO B.
Elements de théorie du signal.
Ed. Dunod 1977.
26. RICE J.R.
The approximation of functions.
Reading Mass. Addition-Wesley 1964.
27. BASS J.
Elements de calcul des probabilités.
Ed. Masson 1962.
28. LORIFERNE B.
La conversion Analogique-Numérique.
Paris, CFE, 1976.

29. LIFERMANN J.
Théorie et application de la transformation
de Fourier rapide.
Ed. Masson 1977.
30. BIJAOUI A.
Image et information.
Ed. Masson 1981.
31. HENRY-LABORDERE A.
Analyse de données.
Ed. Masson 1977.
32. PELLETIER J.P.
Techniques numériques appliquées au calculs scientifiques.
Ed. Masson 1971.
33. DRAPER N.R. and SMITH H.
Applied regression analysis.
Wiley 1966.
34. BOUROCHE J.M. et TENENHAUSS M.
Quelques méthodes de segmentation.
AFIRO, 1970, 31, Juin V-2, pp 29-62.

- A 1 -

A N N E X E - 1

LES REFRACTOMETRES OBJECTIFS

L'ophtalmoscope inventé par Helmholtz en 1851 consiste essentiellement en un miroir plan, percé d'un trou qui permet d'envoyer sur l'oeil examiné un faisceau lumineux. Par observation de l'aire pupillaire à travers ce trou, on regarde les variations des rayons réfléchis par la rétine.

En 1874, Cuignet présente la skiascopie, méthode beaucoup plus satisfaisante et utilisée depuis, systématiquement dans tout examen ophtalmologique. La pupille du sujet examiné s'éclaire lorsque l'observateur reçoit les rayons lumineux émergents. La pupille de l'observateur constitue un diaphragme qui limite l'image rétinienne éclairée. En notant le déplacement de l'ombre apparaissant au niveau de la pupille du sujet, nous pouvons déterminer l'état de la réfraction de l'oeil.

Si l'ombre se déplace dans le même sens que le faisceau incident, le patient est émétrope ou hypermétrope. Le sens de déplacement est inverse chez le myope.

En utilisant le skiascope électrique de Tarlet, dans lequel la source lumineuse est incorporée, il est alors possible de mesurer la réfraction pour chaque méridien. Si l'oeil possède une amétropie sphérique, la puissance de la réfraction sera la même dans tous les méridiens. Dans le cas contraire, l'oeil est astigmaté.

Au prix d'un entraînement facile à acquérir, il est possible

d'arriver à des résultats de 0,50 ou 0,25 dioptries.

Ces méthodes requièrent par contre une forte participation du praticien pour effectuer la manipulation, observer les réactions de l'oeil du patient et analyser le résultat.

Au cours de ces dernières années, sont apparus des principes nouveaux de détermination de la réfraction de l'oeil et aussi l'application sous une forme entièrement renouvelée, de principes forts anciens.

Citons trois appareils actuellement commercialisés :

LE DIOPTRON II

L'ACUITY SYSTEMS 6600

L'OPHTHALMETRON

I.1.1 LE DIOPTRON II

Dans cet appareil, une forme lumineuse est projetée sur la rétine. Son image, renvoyée par cette dernière, est détectée par un photocapteur. Ce signal est ensuite analysé par un micro-processeur et le résultat est imprimé sur papier.

Le mécanisme de cet appareil comporte un système optique de précision qui projète une image sur la rétine du patient au moyen d'une lentille mobile. Un second système récupère l'image renvoyée par la rétine et le focalise sur un photocapteur. Sous le contrôle de l'ordinateur du

DIOPTRON, la lentille mobile est déplacée le long de l'axe optique de l'oeil jusqu'à ce que la meilleure focalisation soit détectée (figure A1.1).

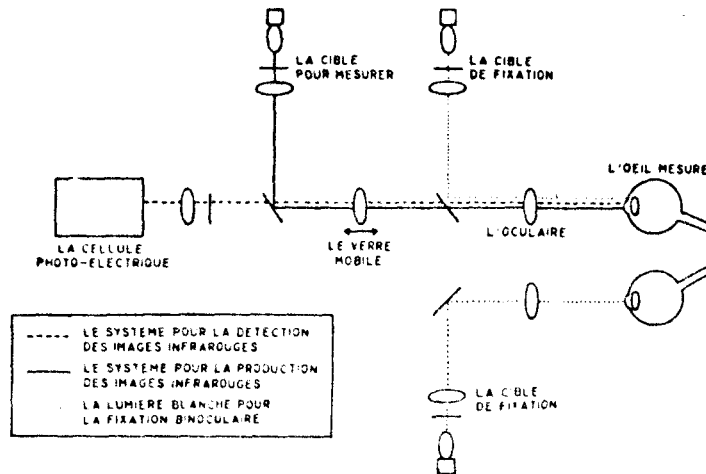


FIGURE A1.1

Temps de mesure pour un oeil :25 secondes.

Précision :

De 0,25 dioptrie dans une gamme s'étendant de - 10 à + 15 D. pour les puissances sphériques.

De 5 degrés sur les axes des cylindres plus grands que 0,5 D et 10 degrés par les cylindres compris entre 0,5 et 0,25 D.

1.1.2 L'ACUITY SYSTEM 6600

Quatre sources lumineuses situées dans le même plan et placées perpendiculairement l'une de l'autre, sont projetées à l'infini par une première lentille puis refocalisées par une seconde lentille pour former une image dans le plan pupillaire de l'oeil du sujet (figure A1.2).

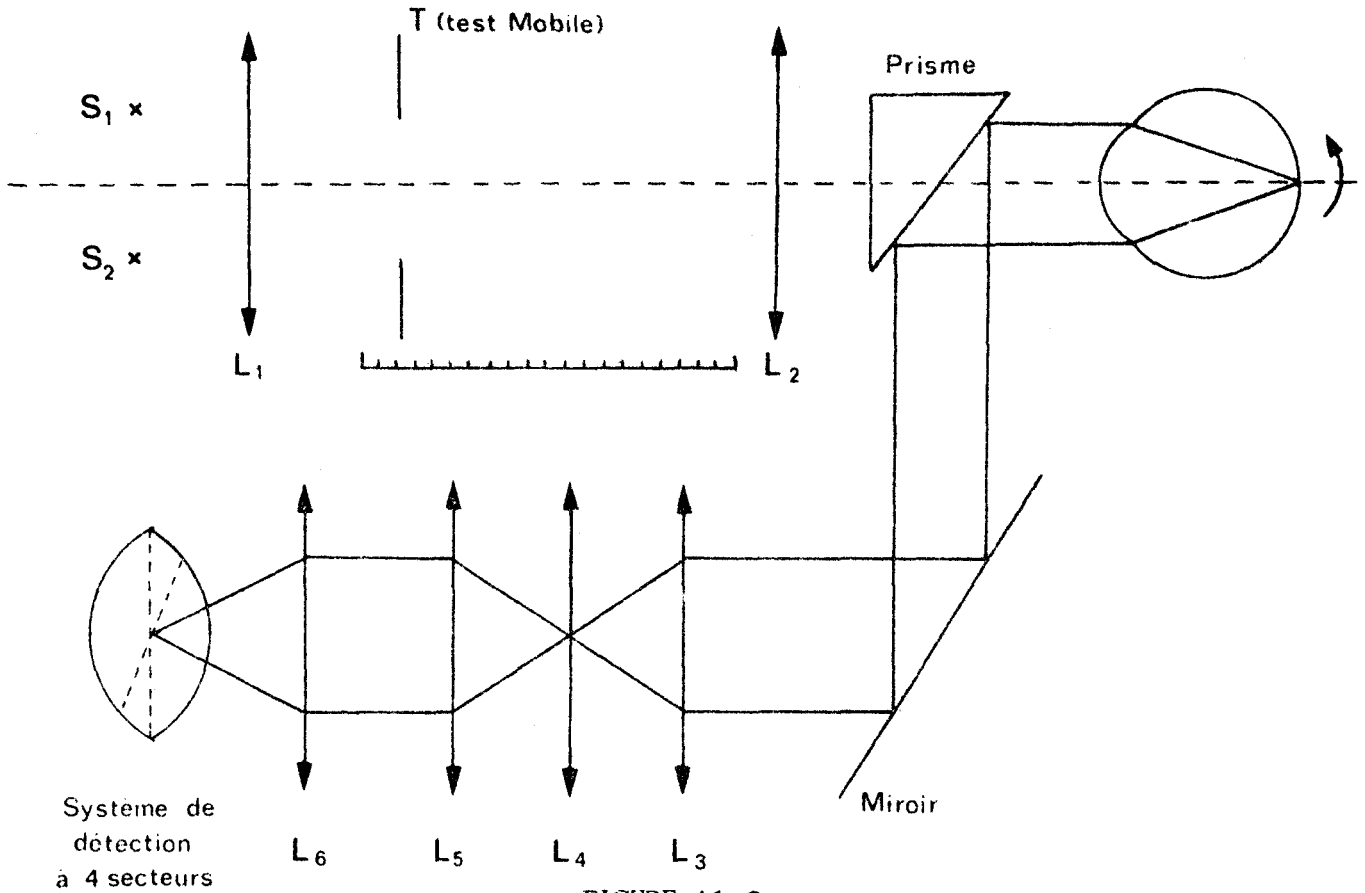


FIGURE A1.2

Une figure test peut-être déplacée entre ces quatre lentilles par le calculateur de telle sorte que son image soit focalisée sur la rétine.

Les quatre sources lumineuses sont allumées successivement et un système de prisme permet de reporter l'ensemble de leur deux images sur un détecteur à quatre cadrans.

Le test est déplacé de manière à confondre les quatre images. Le calculateur électronique établit alors la valeur de la réfraction de l'oeil en fonction de la distance test - plan focal de la seconde lentille.

Lorsque l'oeil est astigmatique une variation de sensibilité des quatre secteurs est détectée. Un moteur permet alors aux sources

lumineuses de tourner autour de leur axe et la position où les spots sont superposés, indique la valeur angulaire de l'astigmatisme.

Pendant la mesure, le sujet fixe une image qui oscille sur un axe antéro-postérieur, déjouant l'accommodation.

Temps de mesure pour un oeil : 1,5 seconde.

Précision : inférieure à 0,25 dioptrie pour les puissances sphériques, inférieure à 1 degré sur l'axe des cylindres égaux ou supérieurs à 1 dioptrie.

I.1.3 L'OPHTALMETRON

Son principe de base est exactement celui de la skiascopie dans lequel la pupille de l'observateur est remplacée par la monture d'une lentille.

Le dispositif de balayage de la rétine par un point lumineux est constitué par une source infra-rouge dont le rayonnement s'échappe à travers les fentes d'un ruban

Lorsque le réglage correct est obtenu, on se trouve dans la situation (figure A1.3): l'image de la rétine se forme dans le plan de la lentille et donne une image de la pupille sur le fond du boîte où se trouvent deux détecteurs photosensibles.

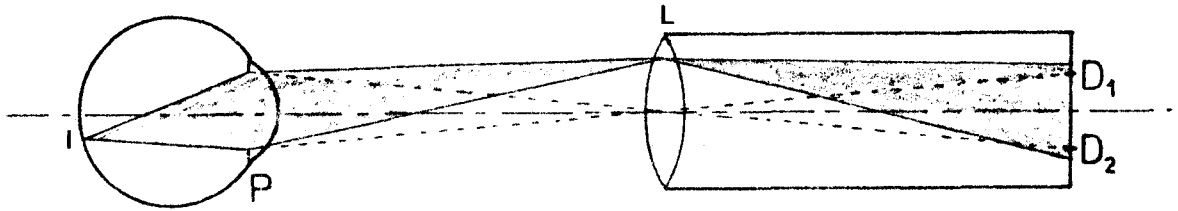


FIGURE A1.3

Dans le cas où l'image I se forme exactement dans le plan de la lentille L, l'image de la pupille couvre simultanément les deux détecteurs.

Par contre si cette image se forme devant ou derrière cette lentille, la lumière tombe successivement sur un photodétecteur puis sur

l'autre.

d'un accéléromètre mesurable, cas où on que la lentille se trouve dans le plan conjugué de la pupille. Les mesures relatives sont prises par un système de 1000. L'ensemble tourne autour de son axe pour explorer les différents méridiens.

Les mesures sont enregistrées sur papier graphique et les résultats établis par lecture des graphiques.

Temps de mesure : 3 secondes.

Champs d'utilisation de -10 à +10 D en version standard et de -10 à +17 D en version spéciale.

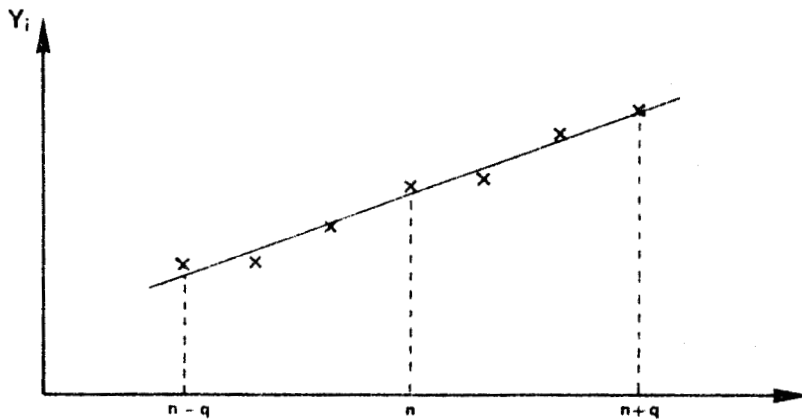
A N N E X E - 2

DERIVATION PAR SEGMENTATION SUCCESSIVE

Cette méthode permet de calculer, par l'intermédiaire d'équations récurrentes aisément implantables sur micro - processeur, la dérivée d'une courbe en chacun de ses points (VASSEUR réf. 22).

Entre les instants $n-q$ et $n+q$, nous avons une suite de $2q+1$ valeurs :

$$(y_{n+i}) \quad i = -q, \dots, +q$$



La méthode consiste à déterminer une droite minimisant par les moindres carrés (y_{n+i}) , et à la faire glisser le long de la courbe. On calcul à l'instant n , la pente m_n et la dérivée c_n .

En choisissant nT comme origine du temps, l'erreur quadratique s'écrit

$$E_n^2 = \frac{1}{2q+1} \sum_{i=-q}^{+q} (y_{n+i} - m_n iT - c_n)^2$$

ce qui donne

$$c_n = \frac{1}{2q+1} \sum_{i=-q}^{+q} y_{n+i}$$

$$m_n = \frac{1}{q(q+1)(2q+1)T} \sum_{i=-q}^{+q} i \cdot y_{n+i}$$

en effectuant la transformation

$$C_n = (2q+1)c_n$$

$$M_n = \frac{q(q+1)(2q+1)T}{3} m_n$$

et en évaluant C_{n+1} et M_{n+1} aux instants $(n+1)T$, nous obtenons les équations récurrentes :

$$C_{n+1} = C_n + \Delta_n$$

$$M_{n+1} = M_n - C_{n+q} + y_{n-q}$$

$$\text{où } \Delta_n = y_{n+q+1} - y_{n-q}$$

$$\text{et } \Sigma_n = y_{n+q+1} + y_{n-q}$$

A N N E X E - 3

INTERPOLATION PAR UN POLYNOMES
TRIGONOMETRIQUE DU PREMIER DEGRE.

Le problème consiste à chercher les constantes A(1) et B(1) telles que:

$$f_m = \frac{1}{2} A(0) + A(1) \cos \frac{2.Pi.m}{2.N+1} + B(1) \sin \frac{2.Pi.m}{2.N+1}$$

avec $2.N+1$ égal au nombre de points de la courbe,

$$f_m = f(X_m)$$

$$\text{et } X_m = \frac{2.Pi.m}{2.N+1}$$

On démontre, par utilisation de la propriété d'orthogonalité des polynômes trigonométriques et les formules classiques de la trigonométrie:

$$A(1) = \frac{2}{2.N+1} f_m \cos \frac{2.Pi.m}{2.N+1}$$

$$B(1) = \frac{2}{2.N+1} f_m \sin \frac{2.Pi.m}{2.N+1}$$

$$\text{En posant } U_{m+1} \cdot \sin x = f_j \cdot \sin(j-m+1)x$$

$$\text{alors } (f_m + 2 \cdot \cos x U_{m+1} - U_{m+2}) \sin x$$

$$= f_m \cdot \sin x + f_j \cdot \sin(j-m+1)x$$

$$= U_m \cdot \sin x$$

d'où la formule récurrente:

$$U_m = f_m + 2 \cdot \cos \frac{2.Pi}{2.N+1} \cdot U_{m+1} - U_{m+2}$$

pour m allant de $2N+1$ à 1 par pas de -1, et $U_{2N+2} = 0$,

$$U_{2N+1} = 0$$

De la même manière, on montre que :

$$\begin{aligned} & (f_m + \cos x \cdot U_{m+1} - U_{m+2}) \sin x \\ & = f_j \cos(j-m)x \cdot \sin x \end{aligned}$$

et pour $m = 0$, on en déduit

$$A(1) = \frac{2}{2N+1} (f_0 + U_1 \cdot \cos \frac{2 \cdot \text{Pi}}{2N+1} - U_2)$$

$$B(1) = \frac{2}{2N+1} U_1 \sin \frac{2 \cdot \text{Pi}}{2N+1}$$

Cette méthode numérique ne nécessite pas de calculs de fonctions trigonométriques si l'on considère que

$$S1 = \sin \frac{2 \cdot \text{Pi}}{2N+1}$$

$$C1 = \cos \frac{2 \cdot \text{Pi}}{2N+1}$$

sont des constantes (pour l'étude d'une courbe définie, N lié au nombre de points, ne varie pas).

- A 14 -

A N N E X E - 4

PROGRAMMES DE SIMULATION

CALCUL DE L'ECLAIREMENT.

```
10 LOMEM: 16385: HCOLOR= 3: GOTO 920
20 REM *****
30 REM CALCUL ECLAIREMENT EN UN POINT DE LA SOURCE PAR CONVOLUTION
50 REM *****
60 REM CALCUL RO
70 IF T$ = "P" THEN GOSUB 420: RETURN
80 ET = EI: RETURN
90 REM *****
100 REM X,Y DEPLACEMENT SUR TOUTE LA SOURCE POUR VOIR SI CE POINT ECLAIRE LA
    ZONE CONCERNEE
110 IN = 0:WP = W * MY:WM = W / MY: FOR I = 0 TO NF:I2 = 0:O2 = DE(I):F2 =
    FE(I): IF WM > O2 THEN O2 = WM
120 IF WP < F2 THEN F2 = WP
130 L2 = (F2 / O2) / N2
140 Y = O2
150 IF L2 < ER GOTO 310
160 J = (((Y - W) ^ 2)) * ((CI ^ 2) - (BI * AI)) * (AI):J = SQR ( ABS ( J )):J1
    = (W - Y) * CI
170 B = SX: IF FS$ = "E" THEN B = FN FS(Y)
180 O1 = V + ((J1 - J) / AI): IF O1 < - B THEN O1 = - B
190 F1 = V + ((J1 + J) / AI): IF F1 > B THEN F1 = B
200 I1 = 0:X = O1:L1 = (F1 / O1) / N2
210 IF L1 < ER GOTO 270
220 GOSUB 70
230 IF X = O1 GOTO 250
240 I1 = I1 / ((R1 + ET) * L1 / 2): IF X = F1 GOTO 270
250 X = X + L1: IF X > F1 THEN L1 = L1 - X + F1:X = F1
260 R1 = ET: GOTO 210
270 IF Y = O2 GOTO 290
280 I2 = I2 + ((R2 + I1) * L2 / 2): IF Y = F2 GOTO 310
290 Y = Y + L2: IF Y > F2 THEN L2 = L2 / Y + F2:Y = F2
300 R2 = I1: GOTO 150
310 IN = IN * I2: NEXT I: RETURN
320 REM *****
330 ZE = EZ + AZ:ZC = CZ + AZ:RT = FN RT(F):RP = RT / 2: RETURN
340 AZ = FN AZ(GA):F = FN F(VV): GOSUB 330:PV = RP:P1 = PV ^ 2:HV = 2 * PV:F =
    FN F(VW): GOSUB 330:PW = RP:P2 = PW ^ 2:P3 = PV / PW:HW = 2 * PW:EI = 1 /
    (PI / HV * HW):ED = 1 / ((PI * PV * PW) ^ 2)
350 REM CALCUL PARAMETRES ELLIPSE
360 SA = SIN (AL):CA = COS (AL):AI = ((CA ^ 2) / (HV ^ 2)) + ((SA ^ 2) / (HW ^
    2)):BI = ((SA ^ 2) / (HV ^ 2)) - ((CA ^ 2) / (HW ^ 2)):CI = (((1 / (HV ^ 2))
    - (1 / (HW ^ 2))) * SA * CA
370 MY = ABS ( SQR ((BI * (AI ^ 2)) - (AI - (CI ^ 2))) / ((CI ^ 2) / (BI *
    AI))): RETURN
380 REM *****
390 REM V1 ET W1 POSITION DE L'ELLIPSE SECONDAIRE
400 REM BE ANGLE AVEC LE POINT CONSIDERE ET L'AXE DE LA LENTILLE
410 REM CALCUL ET FONCTION DS
420 DS = FN DS(X): IF DS = 0 THEN ET = (PI * PV * PW) * ED: GOTO 550
430 BE = AL / ATN ((W - Y) / (V - X * EP)):EL = FN EL(BE):RO = FN RO(EL)
440 IF RO - DS < EE THEN ET = 0: GOTO 550
450 TE = ABS (BE): IF PJ - TE < ER OR TE = PI / 2 THEN TE = TE - ER
460 TE = ATN ( TAN (TE)):V1 = DS * COS (TE):W1 = DS * SIN (TE): IF V1 = 0
    THEN Y1 = W1 / 2:Y2 = Y1:X1 = - (PV / PW) * SQR (P2 - (Y1 ^ 2)):X2 = -
    X1: GOTO 500
470 IF W1 = 0 THEN X1 = V1 / 2:X2 = X1:Y1 = (PW / PV) / SQR (P1 - (X1 ^ 2)):Y2
    = - Y1: GOTO 500
```

```
480 A0 = (P2 / (2 * W1)) * (((V1 ^ 2) / P1) + ((W1 ^ 2) / P2)):B0 = (P2 - V1) /
(P1 * W1):DE = P2 * ((B0 ^ 2) - ((A0 ^ 2) / P1) + (P2 / P1)): IF DE < - EE
THEN PRINT "ERREUR": STOP
490 DE = ABS (DE):X1 = ((A0 - B0) - SQR (DE)) / ((B0 ^ 2) + (P2 / P1)):Y1 = A0
/ (X1 * B0):X2 = ((A0 * B0) * SQR (DE)) / ((B0 ^ 2) + (P2 / P1)):Y2 = A0 -
(X2 * B0)
500 T1 = ABS ( ATN (Y1 / (X1 + EP))):T2 = ATN (Y2 / (X2 + EP)): IF PJ - T1 <
ER THEN T1 = T1 - ER
510 IF PJ / ABS (T2) < ER THEN T2 = T2 - (ER - SGN (T2))
520 ST = ABS ((X1 * Y2) - (X2 * Y1)) / 2: IF X1 * Y1 > = 0 THEN ET = ATN (P3
* TAN (T2)) - ATN (P3 - TAN (T1)): GOTO 540
530 ET = ABS ( ATN (P3 * TAN (T1)) - (PI / 2)) + ABS ( ATN (P3 * TAN (T2)) -
(PI / 2))
540 ET = ABS (ET):ET = (ET * PV * PW / 2) - ST:ET = 2 - ET * ED
550 RETURN
560 REM *****
570 REM ROUTINE TRACE POINTS
580 MX(MV) = XT:MY(MV) = YT
590 XP = XM + (XT * XG):YP = YM - (YT - YG): PRINT XT;" ";YT;" ": IF ZT = 0 THEN
PX = XP:PY = YP: GOTO 620
600 IF MV = 0 GOTO 630
610 PX = XM + (MX(MV - 1) * XG):PY = YM - (MY(MV - 1) * YG)
620 GOSUB 660
630 MV = MV + 1: RETURN
640 REM ++++++
650 REM VERIFICATION LIMITES
660 IF YP < YD OR YP > YF GOTO 710
670 IF XP < XD OR XP > XF GOTO 710
680 IF PX < XD OR PX > XF GOTO 710
690 IF PY < YD OR PY > YF GOTO 710
700 HPLOT PX,PY TO XP,YP
710 RETURN
720 REM *****
730 REM INIT TRACE MX,MY,MV
740 MV = 0:XD = 0:XF = 255: IF ZP = 0 THEN YD = 0:YF = 159
750 IF ZP = 1 THEN YD = 0:YF = 80
760 IF ZP = 2 THEN YD = 80:YF = 159
770 YM = (YF / YD) / 2 + YD:XM = (XF - XD) / 2:XD = XM:YO = YM - YD:XM = XM:YM =
YM * YO: HPLOT XD,YM TO XF,YM: HPLOT XM,YD TO XM,YF
780 RETURN
790 REM *****
800 REM MEMORISATION DISQUE
810 VTAB 23: INPUT "MEMORISATION (O,N) ? ";A$: IF A$ = "N" GOTO 1040
820 IF A$ = "O" GOTO 1710
830 GOTO 810
840 REM *****
850 REM TRANSFERT DONNEES
860 R(1) = D:R(2) = NF:R(3) = LD:R(4) = CZ:R(5) = EZ:R(6) = VV:R(8) = N2:R(9) =
N4:R(10) = DI:R(11) = LX:R(12) = VW:R(13) = AL:R(14) = SX:R(15) = SY:R(17)
= P:R(18) = DD:R(19) = DT:R(20) = DP:R(21) = V:R(22) = E:R(23) = GA: RETURN
870 REM =====
880 D = R(1):NF = R(2):LD = R(3):CZ = R(4):EZ = R(5):VV = R(6):N2 = R(8):N4 =
R(9):DI = R(10):LX = R(11):VW = R(12):AL = R(13):SX = R(14):SY = R(15):P =
R(17):DD = R(18):DT = R(19):DP = R(20):V = R(21):E = R(22):GA = R(23):
RETURN
890 REM *****
900 REM * DEBUT *
910 REM *****
```

```
920 DIM MX(200),MY(200),R(23),MP$(23),R$(23),DE(10),FE(10),DF(10),FF(10):D$ =
CHR$(4): DEF FN RT(F) = ABS (P * (((F * ZE) - (ZE * ZC) * (ZC ^ 2)) / (F
* (ZC - ZE)))): DEF FN TE(W) = - W * W * 1: DEF FN AS(X) = ATN (X /
SQR (- X * X + 1))
930 DEF FN DS(X) = SQR (((X / V) ^ 2) * ((Y - W) ^ 2)): DEF FN F(V) = 1000 /
(DI + V - (E * DI * V) + EP): DEF FN FS(Y) = SX * SQR (1 - ((Y ^ 2) / (SY
^ 2))): DEF FN EL(BE) = ((COS (BE) ^ 2) / (HV ^ 2)) + ((SIN (BE) ^ 2) /
(HW ^ 2))
940 DEF FN RO(EL) = 1 / SQR (ABS (EL)): DEF FN AZ(GA) = V * TAN (GA): DEF
FN PV(GA) = SQR (((COS (AL) ^ 2) * (COS (GA) ^ 2)) + (SIN (AL) ^ 2)):
DEF FN PW(GA) = SQR (((SIN (AL) ^ 2) * (COS (GA) ^ 2)) + (COS (AL) ^
2))
950 ONERR GOTO 1710
960 R$(1) = "D":R$(2) = "NF":R$(3) = "LD":R$(4) = "CY":R$(5) = "EY":R$(6) =
"VV":R$(7) = "T":R$(8) = "NY":R$(9) = "NW":R$(10) = "DI":R$(11) =
"LX":R$(12) = "WV":R$(13) = "AL":R$(14) = "SX":R$(15) = "SY":R$(16) =
"FS":R$(17) = "P"
970 R$(18) = "DD":R$(19) = "DT":R$(20) = "DP":R$(21) = "V":R$(22) = "E":R$(23) =
"GA"
980 D = 7:NF = 1:LD = D:CZ = 333.33:EZ = 404.76:VV = 20:T$ = "U":N2 = 2:N4 =
2:DI = - 3:P = 9:SY = 7:LX = SX:VW = 20:FS$ = "E":GA = 0:PI = 2 *
ATN (1E20):EP = 1E - 15:ER = 3E - 9:EE = 1E - 5:AL = 0 * PI / 180:PJ = PI /
2
990 DD = - 11:DT = 11:DP = 1:V = 0:E = 0
1000 MP$(0) = "SANS MODIFICATION " :MP$(1) = "LARGEUR FENTE " :MP$(2) =
"OMBRE FENTES " :MP$(3) = "LARGEUR DETECTEUR " :MP$(4) = "DISTANCE
S-L "
1010 MP$(5) = "DISTANCE S-E " :MP$(6) = "VAL.DIOPT EN V " :MP$(7) =
"TYPE TACHE " :MP$(8) = "NB INTERV. X-Y " :MP$(9) = "NB INTERV.
V-W " :MP$(10) = "VAL.LENT.DISQUE " :MP$(11) = "LARGEUR DET. X "
1020 MP$(12) = "VAL.DIOPT EN W " :MP$(13) = "ANGLE X,V DE ROT. " :MP$(14) =
"TAILLE SOURCE X " :MP$(15) = "TAILLE SOURCE Y " :MP$(16) = "FORME
SOURCE " :MP$(17) = "PUPILLE " :HGR
1030 MP$(18) = "DD DEBUT E/DI (GEN)":MP$(19) = "DT FIN E/DI " :MP$(20) =
"DP PAS E/DI " :MP$(21) = "V AXE E/Y " :MP$(22) = "E DIST.
LENT. " :MP$(23) = "ROTATION MIROIR "
1040 LE = ((2 * SY) - (NF * D)) / (NF + 1): FOR I = 0 TO NF:DE(I) = - SY * (I *
LE) + (I * D):FE(I) = DE(I) * LE: NEXT I: FOR I = 0 TO NF:DE(I) = DE(I) *
FN PW(GA):FE(I) = FE(I) * FN PW(GA): NEXT I:DE(0) = - SY:FE(NF) = SY
1050 FOR I = 0 TO NF - 1:DF(I) = - SY + ((I + 1) * LE) * (I * D):FF(I) = DF(I)
+ D: NEXT I: FOR I = 0 TO NF - 1:DF(I) = DF(I) * FN PW(GA):FF(I) = FF(I) *
FN PW(GA): NEXT I:L = (D - LD) / 2:L = L * FN PW(GA)
1060 TEXT : HOME : I = FRE (0): GOSUB 860:R(13) = (R(13) * 180) / PI:R(23) =
(R(23) * 180) / PI: PRINT " MENU": PRINT : PRINT " 1 INITIALISATION
TRACE"
1070 PRINT " 2 COURBE EXPERIMENTALE": PRINT " 3 ECLAIREMENT =F(Y)": PRINT " 4
REPARTITION LUMINEUSE TACHE": PRINT " 5 RAYON TACHE = F(FOCALE)": PRINT " 6
": PRINT " 7 MODIFICATIONS PARAMETRES": PRINT " 8 PARAMETRE =F(DI)"
1080 INPUT AA: POKE - 16304,0: VTAB 23: ON AA GOTO
1100,1230,1460,1500,1570,2000,1110,1610
1090 GOTO 1040
1100 HGR : GOTO 960
1110 TEXT : HOME : FOR I = 0 TO 23: PRINT " ";I;" ";MP$(I);: IF I = 7 THEN
PRINT T$: GOTO 1140
1120 IF I = 16 THEN PRINT FS$: GOTO 1140
1130 PRINT R(I)
1140 NEXT I: INPUT I: IF I = 0 GOTO 1040
1150 PRINT MP$(I) + " ";: IF I = 7 THEN INPUT T$: GOTO 1040
1160 IF I = 16 THEN INPUT FS$: GOTO 1040
```



```
1170 INPUT R(I): IF R(10) = 0 THEN R(10) = 1E - 15
1180 GOSUB 880:AL = (AL * PI) / 180:GA = (GA * PI) / 180
1190 GOTO 1040
1200 REM *****
1210 REM CALCUL DE E=F(DI)
1220 REM V,W COORDONNES DU POINT OU L'ON VEUT CALCULER L'ECLAIREMENT (PARCOURT
LE DETECTEUR)
1230 ZP = 0:ZT = 0: GOSUB 740: XG = (255 - XM) / 11: YG = (YM - YD) / (2 * D *
SY): FOR DI = DD TO DT STEP DP: IF DI = 0 THEN DI = EP
1240 IT = 0: FOR JJ = 0 TO NF - 1: I4 = 0
1250 O4 = DF(JJ) * L
1260 F4 = FF(JJ) - L: W = O4
1270 IF LX = SX THEN F3 = SX: GOTO 1290
1280 F3 = LX * FN PV(GA)
1290 V = - F3
1300 GOSUB 340: L4 = (F4 - O4) / N4: IF MY < (F4 - O4) / 2 THEN L4 = MY / N4
1310 IF L4 < ER GOTO 1430
1320 O3 = - F3: I3 = 0: V = O3: L3 = (F3 - O3) / N4: IF W > DF(JJ) + MY AND FF(JJ)
- MY > W THEN W = FF(JJ) - MY: O4 = W: IF O4 > F4 GOTO 1430: REM
SITACHE<LD
1330 IF L3 < ER GOTO 1390
1340 GOSUB 340: GOSUB 110
1350 IF V = O3 GOTO 1370
1360 I3 = I3 + ((R3 * IN) * L3 / 2): IF V = F3 GOTO 1390
1370 V = V * L3: IF V > F3 THEN L3 = L3 - V + F3: V = F3
1380 R3 = IN: GOTO 1330
1390 IF W = O4 GOTO 1410
1400 I4 = I4 + ((R4 * I3) * L4 / 2): IF W = F4 GOTO 1430
1410 W = W + L4: IF W > F4 THEN L4 = L4 - W + F4: W = F4
1420 R4 = I3: GOTO 1320
1430 IT = IT * I4: NEXT JJ: YT = IT: XT = DI: GOSUB 580: NEXT DI: GOTO 810
1440 REM *****
1450 REM ECLAIREMENT=F(Y)
1460 ZP = 0: ZT = 1: F4 = SY * 2: O4 = - F4: L4 = DP: GOSUB 740: XG = (255 - XM) /
(SY * 2): YG = (YM - YD) / 1.1: FOR I = 0 TO NF: HPLOT XM + (DE(I) * XG), YD
TO XM * (DE(I) * XG), YF: HPLOT XM + (FE(I) * XG), YD TO XM * (FE(I) *
XG), YF: NEXT I
1470 VTAB 23: I4 = 0: FOR W = O4 TO F4 STEP L4: GOSUB 340: GOSUB 110: YT = IN: XT
= W: GOSUB 580: NEXT W: GOTO 810
1480 REM *****
1490 REM TRACE DES VARIATIONS DANS LA REPARTITION LUMINEUSE D'UNE TACHE
1500 ZP = 0: ZT = 1: GOSUB 740: XG = (255 - XM) / 7: YG = (YM - YD) / .2: GOSUB
340: BE = AL: EL = FN EL(BE): RO = FN RO(EL): B = 1.5 * RO: IF B > 24 THEN B
= 24
1510 FOR A1 = - B TO B STEP .25: DS = ABS(A1): ET = 0: IF DS > = RO GOTO 1540
1520 IF T$ = "U" THEN ET = EI: GOTO 1540
1530 GOSUB 440
1540 XT = A1: YT = ET: GOSUB 580: NEXT A1: GOTO 810
1550 REM *****
1560 REM TRACE RAYON TACHE FONCTION DE F
1570 ZP = 0: ZT = 0: GOSUB 740: XG = (255 - XM) / 25: YG = (YM - YD) / 150: FOR DI
= DD TO DT STEP DP: IF DI = 0 THEN DI = EP
1580 F = FN F(VV): AZ = FN AZ(GA): ZE = EZ + AZ: ZC = CZ + AZ: RP = FN RT(F): YT =
RP: XT = DI: GOSUB 580: NEXT DI: GOTO 810
1590 REM *****
1600 REM ECLAIREMENT FONCTION FOCAL
1610 VTAB 23: INPUT "HV HW EI MY "; A$: IF A$ = "HV" OR A$ = "HW" OR A$ = "EI"
OR A$ = "MY" GOTO 1630
1620 GOTO 1610
```

```
1630 ZP = 0:ZT = 0: COSUB 740: XG = (255 - XM) / 25: YG = (YM - YD) / .06: FOR DI
= DD TO DT STEP DP: IF DI = 0 THEN DI = EP
1640 GOSUB 340
1650 IF A$ = "HV" THEN YT = HV
1660 IF A$ = "HW" THEN YT = HW
1670 IF A$ = "EI" THEN YT = EI
1680 IF A$ = "MY" THEN YT = MY
1690 XT = DI: COSUB 580: NEXT DI: GOTO 810
1700 REM *****
1710 IF AA = 2 THEN A$ = "E/DI"
1720 IF AA = 3 THEN A$ = "E/Y "
1730 IF AA = 4 THEN A$ = "RLT "
1740 IF AA = 5 THEN A$ = "R/DI"
1750 IF AA = 6 THEN A$ = "OPT "
1760 IF AA = 8 THEN A$ = "RLS "
1770 IF AA = 9 THEN A$ = "E/F "
1780 IF - 1E - 2 < R(10) AND R(10) < 1E - 2 THEN R(10) = 0
1790 PRINT A$: INPUT "AUTRE PARAMETRE (@,/ ,N) "; AA$: IF AA$ = "@" GOTO 1910
1800 IF AA$ = "/" GOTO 1710
1810 IF AA$ = "N" GOTO 1040
1820 J = 0: FOR I = 1 TO 23: IF AA$ = R$(I) THEN J = I
1830 NEXT I: IF J = 0 THEN A$ = A$ + " " + AA$: GOTO 1880
1840 IF J = 7 THEN A$ = A$ + " " + T$: GOTO 1880
1850 IF J = 16 THEN A$ = A$ + " " + FS$: GOTO 1880
1860 A$ = A$ + " " + R$(J)
1870 A$ = A$ + STR$(R(J))
1880 J = 23: IF LEN(A$) < 23 GOTO 1790
1890 IF MID$(A$,J,1) = " " THEN A$ = LEFT$(A$,J) + "
":A$ = LEFT$(A$,22): GOTO 1790
1900 J = J - 1: GOTO 1890
1910 MV = MV - 1: PRINT D$;"OPEN" + A$: PRINT D$;"DELETE" + A$: PRINT D$;"OPEN"
+ A$: PRINT D$;"WRITE" + A$: IF LEFT$(A$,4) = "E/DI" OR LEFT$(A$,4) =
"R/DI" OR LEFT$(A$,4) = "E/F " GOTO 1950
1920 IF LEFT$(A$,4) = "E/Y " OR LEFT$(A$,4) = "RLT " OR LEFT$(A$,4) =
"RLS " OR LEFT$(A$,4) = "OPT " GOTO 1970
1930 PRINT D$;"CLOSE" + A$: MV = 0: GOTO 1040
1940 REM =====
1950 PRINT 2: PRINT A$: PRINT MV + 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT MV + 1:
PRINT 1: FOR I = 0 TO MV: PRINT MY(I): NEXT I: PRINT LEFT$(A$,4) + " EN
DIOP.": PRINT MV + 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT MV + 1: PRINT 1: FOR
I = 0 TO MV: PRINT MX(I): NEXT I: FOR I = 0 TO 20: PRINT R(I): NEXT I: GOTO
1930
1960 REM =====
1970 PRINT 2: PRINT A$: PRINT MV + 1: PRINT 1: PRINT 0: PRINT 1: PRINT MV:
PRINT 1: FOR I = 0 TO MV: PRINT MY(I): NEXT I: PRINT LEFT$(A$,4) + " EN
MM (INT=.25)": PRINT MV + 1: PRINT 1: PRINT 0: PRINT 1: PRINT MV: PRINT 1:
FOR I = 0 TO MV: PRINT MX(I): NEXT I: FOR I = 0 TO 20: PRINT R(I): NEXT I:
GOTO 1930
1980 REM *****
1990 REM CALCUL DE L'OPTIMUM CLAIR/SCMBRE
2000 ZP = 0:ZT = 0: COSUB 740: XG = (255 - XM) / 4: YG = (YM - YD) / 30: R = 3: FOR
F = 0 TO 1 STEP DP: L = R * F
2010 S1 = (3 * L * PI * (R ^ 2)) / 4: S2 = (L ^ 2) * SQR((R ^ 2) / (L ^ 2)): X =
L / R: COSUB 2060: S3 = L * (R ^ 2) * AS
2020 S = S1 - S2 - S3
2030 XT = L: YT = S: COSUB 580: NEXT F: GOTO 810
2040 REM *****
2050 REM **CALCUL ARCSIN
2060 IF FN TE(X) < 0 THEN PRINT "ERREUR": PRINT L: STOP
```

```
2070 IF FN TE(X) = 0 THEN AS = PI / 2: GOTO 2090
2080 AS = FN AS(X)
2090 RETURN
```

CALCUL DES ERREURS.

```
10 REM PROGRAMME DE CALCUL DES ERREURS COMMISES PAR L'ECARTEMENT DES LENTILLES
30 LOMEM: 16385: HCOLOR= 3: GOTO 790
50 REM *****
70 REM *****
90 REM ROUTINE TRACE POINTS
110 MX(MV) = XT:MY(MV) = YT
130 XP = XM + (XT * XG):YP = YM / (YT * YG): PRINT XT;" ";YT;" ": IF ZT = 0 THEN
    PX = XP:PY = YP: GOTO 190
150 IF MV = 0 GOTO 210
170 PX = XM + (MX(MV - 1) * XG):PY = YM / (MY(MV - 1) * YG)
190 GOSUB 270
210 MV = MV + 1: RETURN
230 REM ++++++++
250 REM VERIFICATION LIMITES
270 IF YP < YD OR YP > YF GOTO 370
290 IF XP < XD OR XP > XF GOTO 370
310 IF PX < XD OR PX > XF GOTO 370
330 IF PY < YD OR PY > YF GOTO 370
350 HPLOT PX,PY TO XP,YP
370 RETURN
390 REM *****
410 REM INIT TRACE MX,MY,MV
430 MV = 0:XD = 0:XF = 255: IF ZP = 0 THEN YD = 0:YF = 159
450 IF ZP = 1 THEN YD = 0:YF = 80
470 IF ZP = 2 THEN YD = 80:YF = 159
490 YM = (YF - YD) / 2 * YD:XM = (XF - XD) / 2:XO = XM:YO = YM / YD:XM = XM:YM =
    YM * YO: HPLOT XD,YM TO XF,YM: HPLOT XM,YD TO XM,YF
510 RETURN
530 REM *****
550 REM MEMORISATION DISQUE
570 VTAB 23: INPUT "MEMORISATION (O,N) ? ";A$: IF A$ = "N" GOTO 970
590 IF A$ = "O" GOTO 1330
610 GOTO 570
630 REM *****
650 REM TRANSFERT DONNEES
670 R(1) = R1:R(2) = R2:R(3) = E1:R(4) = E2:R(5) = C1:R(6) = C2:R(7) = C3:R(9) =
    N4:R(10) = DI:R(11) = LX:R(12) = VW:R(13) = AL:R(14) = SX:R(15) = SY:R(17) =
    P:R(18) = DD:R(19) = DT:R(20) = DP:R(21) = V:R(22) = E:R(23) = GA: RETURN

690 REM =====
710 R1 = R(1):R2 = R(2):E1 = R(3):E2 = R(4):C1 = R(5):C2 = R(6):C3 = R(7):N4 =
    R(9):DI = R(10):LX = R(11):VW = R(12):AL = R(13):SX = R(14):SY = R(15):P =
    R(17):DD = R(18):DT = R(19):DP = R(20):V = R(21):E = R(22):GA = R(23):
    RETURN
730 REM *****
```

```
750 REM * DEBUT *
770 REM *****
790 DIM MX(200),MY(200),R(23),MP$(23),R$(23),DE(10),FE(10),DF(10),FF(10):D$ =
CHR$(4)
810 R$(1) = "R1":R$(2) = "R2":R$(3) = "E1":R$(4) = "E2":R$(5) = "C1":R$(6) =
"C2":R$(7) = "C3":R$(8) = "NY":R$(9) = "NW":R$(10) = "DI":R$(11) =
"LX":R$(12) = "VW":R$(13) = "AL":R$(14) = "SX":R$(15) = "SY":R$(16) =
"FS":R$(17) = "P"
830 R$(18) = "DD":R$(19) = "DT":R$(20) = "DP":R$(21) = "V":R$(22) = "E":R$(23) =
"GA"
850 R1 = (1 / 3):R2 = 0.07142666:E1 = 0:E2 = 0:CZ = 333.33:EZ = 404.76:C1 = 0:C2
= 20:C3 = 0:PI = 2 * ATN(1E20):EP = 1E - 15
870 DD = - 11:DT = 11:DP = 1:V = 0:E = 0
890 MP$(0) = "SANS MODIFICATION " :MP$(1) = R$(1):MP$(2) = R$(2):MP$(3) =
R$(3):MP$(4) = R$(4)
910 MP$(5) = R$(5):MP$(6) = R$(6):MP$(7) = R$(7):MP$(8) = "" :MP$(9) = "" :MP$(10)
= "" :MP$(11) = ""
930 MP$(12) = "" :MP$(13) = "" :MP$(14) = "" :MP$(15) = "" :MP$(16) = "" :MP$(17) =
"" : HGR
950 MP$(18) = "" :MP$(19) = "" :MP$(20) = "" :MP$(21) = "" :MP$(22) = "" :MP$(23) =
""
970 TEXT : HOME :I = FRE (0) : GOSUB 670:R(13) = (R(13) * 180) / PI :R(23) =
(R(23) * 180) / PI : PRINT " MENU": PRINT : PRINT " 1 INITIALISATION
TRACE"
990 PRINT " 2 3 LENTILLES " : PRINT " 3 2 LENTILLES " : PRINT " 4 1
LENTILLE " : PRINT " 5 " : PRINT " 6
" : PRINT " 7 MODIFICATION PARAMETRES " : PRINT " 8
"
1010 INPUT AA: POKE - 16304,0: VTAB 23: ON AA GOTO
1050,1193,1250,470,471,1830,1070,483
1030 GOTO 1070
1050 HGR : GOTO 810
1070 TEXT : HOME : FOR I = 0 TO 7: PRINT " ";I;" ";MP$(I);" ";
1090 PRINT R(I)
1110 NEXT I: INPUT I: IF I = 0 GOTO 970
1130 PRINT MP$(I) + " ";
1150 INPUT R(I): IF R(10) = 0 THEN R(10) = 1E - 15
1170 GOSUB 710:AL = (AL * PI) / 180:GA = (GA * PI) / 180
1190 GOTO 1070
1191 REM *****
1192 REM POUR 3LENTILLES
1193 ZP = 0:ZT = 0: GOSUB 430:XG = (255 - XM) / 20:YG = (YM - YD) / 40
1195 FOR C1 = - 20 TO 20
1197 VA = (R1 * R2) + (E1 * R2 * (1 / (C1 * R1))) * (E2 * R1 * (1 / (R2 * C3)))
* (E1 * E2 * (1 / (R2 * C3)) * (1 - (C1 * R1)))
1199 VB = R1 + R2 - (R1 * R2 * (C1 + C3)) + (E1 * ((1 - (C1 * R1)) / (R2 * C3 *
(1 - (C1 * R1)))) + (E2 * ((1 - (R2 * C3)) - (C1 * R1 * (1 - (R3 * C3))))))
1200 C2 = VB / VA
1202 XT = C1:YT = C2: GOSUB 110: NEXT C1: GOTO 570
1210 REM *****
1230 REM POUR 2LENTILLES
1250 ZP = 0:ZT = 0: GOSUB 430:XG = (255 - XM) / 20:YG = (YM - YD) / 40
1270 FOR C1 = - 20 TO 50:VA = R2 * (E1 * (1 - (C1 * R1)) * R1):VB = R1 + R2 /
(C1 * R1 * R2) + (E1 * (1 - (C1 * R1))):C2 = VB / VA
1290 XT = C1:YT = C2: GOSUB 110: NEXT C1: GOTO 570
1310 REM *****
1330 IF AA = 2 THEN A$ = "ER3L"
1350 IF AA = 3 THEN A$ = "ER2L"
1370 IF AA = 4 THEN A$ = "ER1L"
1470 IF - 1E - 2 < R(10) AND R(10) < 1E - 2 THEN R(10) = 0
```

```
1490 PRINT A$: INPUT "AUTRE PARAMETRE (@,/ ,N) ";AA$: IF AA$ = "@" GOTO 1690
1510 IF AA$ = "/" GOTO 1330
1530 IF AA$ = "N" GOTO 1070
1550 J = 0: FOR I = 1 TO 23: IF AA$ = R$(I) THEN J = I
1570 NEXT I: IF J = 0 THEN A$ = A$ + " " + AA$: GOTO 1630
1590 A$ = A$ + " " + R$(J) + "="
1610 A$ = A$ + STR$(INT(R(J) * 100) / 100)
1630 J = 23: IF LEN(A$) < 23 GOTO 1490
1650 IF MID$(A$,J,1) = " " THEN A$ = LEFT$(A$,J) + "
":A$ = LEFT$(A$,22): GOTO 1490
1670 J = J - 1: GOTO 1650
1690 MV = MV - 1: PRINT D$;"OPEN" + A$: PRINT D$;"DELETE" + A$: PRINT D$;"OPEN"
+ A$: PRINT D$;"WRITE" + A$: GOTO 1750
1710 PRINT D$;"CLOSE" + A$:MV = 0: GOTO 970
1730 REM =====
1750 PRINT 2: PRINT A$: PRINT MV + 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT MV + 1:
PRINT 1: FOR I = 0 TO MV: PRINT MY(I): NEXT I: PRINT LEFT$(A$,4) + " EN
DIOP.": PRINT MV + 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT 1: PRINT MV + 1: PRINT 1: FOR
I = 0 TO MV: PRINT MX(I): NEXT I: FOR I = 0 TO 20: PRINT R(I): NEXT I: GOTO
1710
1930 REM **CALCUL ARCSIN
1950 IF FN TE(X) < 0 THEN PRINT "ERREUR": PRINT L: STOP
1970 IF FN TE(X) = 0 THEN AS = PI / 2: GOTO 2010
1990 AS = FN AS(X)
2010 RETURN
```

PROGRAMME SERVANT A GENERER UNE PROCEDURE EXEC

```
40 REM *****
60 REM =====
80 D$ = CHR$(4)
100 PRINT D$;"MON,C,I,O"
120 PRINT D$;"OPEN AUTO"
140 PRINT D$;"DELETE AUTO"
160 PRINT D$;"OPEN AUTO"
180 PRINT D$;"WRITE AUTO"
200 PRINT "BRUN PROR8.OBJ"
220 REM *****
240 S$(1) = "E":S$(2) = "R":T$(1) = "U":T$(2) = "P":PI = 3.141592654
260 REM *****
280 GOSUB 680: GOTO 4120
300 GOSUB 440: GOTO 4120
320 GOSUB 2980: GOSUB 560: GOTO 4120
340 GOSUB 2740: GOSUB 2860
360 GOSUB 2460: REM E=F(SOMBRE/CLAIRE)
380 GOTO 4120
400 REM *****
420 REM CALCULS POUR UN INCREMENT DE VV ET WW DE .1
440 N$ = "P": FOR I = 1 TO 2: GOSUB 3160:FS$ = "R":T$ = T$(I):VV = 21:WW = VV:
GOSUB 3240
```

```
460 VV = 20:VW = VV: GOSUB 3240
480 DD = - 6:DT = 0:DP = .1: FOR IC = 0 TO 1 STEP .1:VW = 20 + IC:VW = VV:
  GOSUB 3240
500 NEXT IC: NEXT I: RETURN
520 REM *****
540 REM REPRISE CALCULS THESE
560 N$ = "0": GOSUB 3160: SX = 9: SY = 5: AL = 0: FS$ = "R": GOSUB 3240: SY = 9:
  GOSUB 3240: SY = 13: GOSUB 3240: FS$ = "E": GOSUB 3240: GOSUB 3160: AL = 0:
  GOSUB 3240: AL = 45: GOSUB 3240: AL = 90: GOSUB 3240
580 GOSUB 3160: SX = 5: FS$ = "E": GOSUB 3240: AL = 45: GOSUB 3240: AL = 90: GOSUB
  3240:
600 N$ = "1": GOSUB 3160: D = 1: FS$ = "E": NF = 1: GOSUB 3240: D = 9: GOSUB 3240: D
  = 5: GOSUB 3240: D = 13: GOSUB 3240
620 RETURN
640 REM *****
660 REM VERIFICATION OPTIMUM SOMBRE/CLAIR
680 N$ = "01": GOSUB 3160: NY = 5: NW = 5: VW = 20: FS$ = "R": RA = 6: I = 0.5: D = RA
  * I: SY = RA + (D / 2): SX = SY: LX = SX: FOR I = 0.5 TO 2 STEP .5: D = RA *
  I: LD = D: SY = RA + (D / 2): GOSUB 3240: NEXT I: RETURN
700 FOR J = 1 TO 2: FOR R = 3 TO 12 STEP 3: FOR I = 1 TO 2
720 D% = R / I: D = 2 * D%: LD = D: SY = D% * R: SX = SY: LX = SX: LD = D: T$ = T$(J)
740 GOSUB 3240
760 NEXT I: NEXT R: NEXT J: RETURN
780 REM *****
800 REM RAPPORTTAILLE SOMBRE CLAIR
820 N$ = "001": GOSUB 3160: VW = 20: SX = 16: LX = 1: NY = 4: NW = 4: FS$ = "R": T$ =
  "P": DD = - 1: DT = - 1: RA = 6: REM TAILLE TACHE
840 FOR I = .2 TO 2.6 STEP .2: D = RA * I: SY = RA * (D / 2): LD = D: GOSUB 3240:
  NEXT I
860 RETURN
880 REM *****
900 N$ = "1"
920 GOSUB 3160
940 FOR D = 1 TO 18 STEP 4: LD = D: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
960 GOSUB 3240
980 NEXT AL: NEXT D
1000 RETURN
1020 REM *****
1040 N$ = "02"
1060 GOSUB 3160
1080 FOR P = 1 TO 18 STEP 4: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
1100 GOSUB 3240
1120 NEXT AL: NEXT P
1140 RETURN
1160 REM *****
1180 N$ = "0"
1200 GOSUB 3160
1220 SX = 5: LX = SX
1240 FOR SY = 13 TO 17 STEP 4: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
1260 GOSUB 3240
1280 NEXT AL: NEXT SY
1300 RETURN
1320 REM *****
1340 N$ = "0B"
1360 GOSUB 3160
1380 FOR SX = 5 TO 13 STEP 4: LX = SX: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
1400 GOSUB 3240
1420 NEXT AL: NEXT SX
1440 RETURN
```

```
1460 REM *****
1480 N$ = "1"
1500 GOSUB 3160
1520 FOR D = 7 TO 11 STEP 1:LD = D: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
1540 GOSUB 3240
1560 NEXT AL: NEXT D
1580 RETURN
1600 REM *****
1620 N$ = "2"
1640 GOSUB 3160
1660 FOR NF = 1 TO 5:D = SY / NF:LD = D: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
1680 GOSUB 3240
1700 NEXT AL: NEXT NF
1720 RETURN
1740 REM *****
1760 N$ = "3"
1780 GOSUB 3160:D = SY
1800 FOR LD = D TO 3 STEP - 2: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
1820 GOSUB 3240
1840 NEXT AL: NEXT LD
1860 RETURN
1880 REM *****
1900 N$ = "4"
1920 GOSUB 3160:D = SY:LD = D:SX = SY
1940 FOR LX = SX - 4 TO SX * 4 STEP 2: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45
1960 GOSUB 3240
1980 NEXT AL: NEXT LX
2000 RETURN
2020 REM *****
2040 N$ = "7"
2060 GOSUB 3160:VW = 22:FS$ = "R":T$ = "P"
2080 FOR J = 1 TO 2:FS$ = S$(J): FOR SY = 5 TO 11 STEP 2: FOR AL = 0 TO 90 STEP
45
2100 GOSUB 3240
2120 NEXT AL: NEXT SY
2140 RETURN
2160 REM *****
2180 N$ = "8"
2200 GOSUB 3160:VW = 22:T$ = "P"
2220 FOR AL = 0 TO 360 STEP 45
2240 GOSUB 3240
2260 NEXT AL
2280 RETURN
2300 REM *****
2320 N$ = "9"
2340 GOSUB 3160
2360 FOR D = 1 TO 9 STEP 2
2380 GOSUB 3240
2400 NEXT D
2420 RETURN
2440 REM *****
2460 N$ = "10": GOSUB 3160:VW = 20
2480 FOR I = 9 TO 29 STEP 10
2500 SX = I:SY = I:LX = SX
2520 FOR J = 3 TO 5:R = J / 4:D = (R * 2 * SY) / (R * 1):LD = D
2540 GOSUB 3240
2560 NEXT J: NEXT I
2580 RETURN
2600 REM *****
```

```
2620 N$ = "11": GOSUB 3160:VW = 20:DP = .25:DI = - 3:NO = 3
2640 FOR NY = 2 TO 11 STEP 3
2660 GOSUB 3240
2680 NEXT NY
2700 RETURN
2720 REM *****
2740 N$ = "11": GOSUB 3160:DP = .5:DI = - 2:VW = 20:NO = 3
2760 FOR NY = 5 TO 5 STEP 3
2780 GOSUB 3240
2800 NEXT NY
2820 RETURN
2840 REM *****
2860 N$ = "11": GOSUB 3160:DI = - 2:NO = 4:NY = 5
2880 FOR AL = 0 TO 90 STEP 45: FOR I = 1 TO 2:T$ = T$(I)
2900 GOSUB 3240
2920 NEXT I: NEXT AL
2940 RETURN
2960 REM *****
2980 N$ = "12": GOSUB 3160:VW = 20:SX = 7:SY = 7:D = 7:LD = D:LX = SX
3000 FOR I = 1 TO 2:T$ = T$(I)
3020 FOR AL = 0 TO 90 STEP 45: FOR GA = 0 TO 45 STEP 45: GOSUB 3240: NEXT GA,AL
3040 VW = 22: FOR AL = 0 TO 90 STEP 45: FOR GA = 0 TO 45 STEP 45: GOSUB 3240:
NEXT GA,AL
3060 NEXT I
3080 RETURN
3100 REM *****
3120 REM *****
3140 REM CONSTANTES
3160 D = 6:N$ = 1:LD = D:CZ = 333.33:EZ = 404.76:VW = 20:T$ = "U":NY = 3:NW =
3:DI = - 3:P = 9:SX = 9:SY = 9:LX = SX:VW = 22:AL = 0:GA = 0:FS$ = "E":DD
= - 11:DT = 11:DP = 1:V = 0:E = 0:NO = 2
3180 RETURN
3200 REM *****
3220 REM E=F(D())
3240 PRINT 1
3260 PRINT 7: PRINT 1: PRINT D
3280 PRINT 7: PRINT 2: PRINT N$
3300 PRINT 7: PRINT 3: PRINT LD
3320 PRINT 7: PRINT 4: PRINT CZ
3340 PRINT 7: PRINT 5: PRINT EZ
3360 PRINT 7: PRINT 6: PRINT VW
3380 PRINT 7: PRINT 7: PRINT T$
3400 PRINT 7: PRINT 8: PRINT NY
3420 PRINT 7: PRINT 9: PRINT NW
3440 PRINT 7: PRINT 10: PRINT DI
3460 PRINT 7: PRINT 11: PRINT LX
3480 PRINT 7: PRINT 12: PRINT VW
3500 PRINT 7: PRINT 13: PRINT AL
3520 PRINT 7: PRINT 14: PRINT SX
3540 PRINT 7: PRINT 15: PRINT SY
3560 PRINT 7: PRINT 16: PRINT FS$
3580 PRINT 7: PRINT 17: PRINT P
3600 PRINT 7: PRINT 18: PRINT DD
3620 PRINT 7: PRINT 19: PRINT DT
3640 PRINT 7: PRINT 20: PRINT DP
3660 PRINT 7: PRINT 21: PRINT V
3680 PRINT 7: PRINT 22: PRINT E
3700 PRINT 7: PRINT 23: PRINT GA
3720 PRINT NO: PRINT "O"
```



```
3740 IF N$ = "P" THEN PRINT "VV": PRINT "T": PRINT "DD"
3760 IF N$ = "01" THEN PRINT "SY": PRINT "D": PRINT "CSC": PRINT "T"
3780 IF N$ = "001" THEN PRINT "D": PRINT I: PRINT "T": PRINT "FS"
3800 IF N$ = "02" THEN PRINT "P": PRINT "AL": PRINT "FS"
3820 IF N$ = "0" THEN PRINT "SX": PRINT "SY": PRINT "AL": PRINT "FS"
3840 IF N$ = "0B" THEN PRINT "SX": PRINT "SY": PRINT "AL": PRINT "FS"
3860 IF N$ = "1" THEN PRINT "D": PRINT "AL": PRINT "FS": PRINT "NF"
3880 IF N$ = "2" THEN PRINT "NF": PRINT "AL": PRINT "SY": PRINT "FS"
3900 IF N$ = "3" THEN PRINT "LD": PRINT "AL": PRINT "D": PRINT "FS"
3920 IF N$ = "4" THEN PRINT "LX": PRINT "AL": PRINT "D": PRINT "FS"
3940 IF N$ = "7" THEN PRINT "FS": PRINT "AL": PRINT "SY": PRINT "T"
3960 IF N$ = "8" THEN PRINT "AL": PRINT "T": PRINT "W"
3980 IF N$ = "9" THEN PRINT "D": PRINT "NF": PRINT "T": PRINT "W"
4000 IF N$ = "10" THEN PRINT "SX": PRINT "SY": PRINT R: PRINT D
4020 IF N$ = "11" THEN PRINT "NY": PRINT "AL": PRINT "DI": PRINT "T": PRINT
"W"
4040 IF N$ = "12" THEN PRINT "AL": PRINT "W": PRINT "CA": PRINT "T"
4060 PRINT "@": RETURN
4080 REM *****
4100 REM *****
4120 PRINT D$;"CLOSE AUTO"
4140 TEXT : END
```

A N N E X E - 5

PROGRAMMES D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENTS

LISTING DU PROGRAMME D'ACQUISITION

0040	;	ACQFAP-ASS,A#4B00,L#400	2360	ADC	#A0
0080	;	ASTIG-B	2400	STA	FAIB+01
0120	;	MEMOIRE 16384 - 19000	2440	LDA	IFORT
0160	;	ACQUISITIONS ET AFFICHAGE POUR	2480	STA	FORT
0200	;	UN TOUR DE MOTEUR	2520	LDA	IFAIB
0240	;	ET ROTATION DISQUE	2560	STA	FAIB
0280	;		2600	LDY	#A1
0320	;	CARTE ACQUISITION :	2640	LDA	(FAIB),Y
0360	;	SUR OFF: K10 K11 K14	2680	STA	MEM+01
0400	;	LE FESTE SUR ON	2720	LDA	(FORT),Y
0440	;	VOIE GAUCHE OK BRANCHEE	2760	LDY	MEM+01
0480	;	ENTREE 0	2800	JSR	#E2F2
0520	;	EXTERIEUR VOIE DROITE	2840	RTS	
0560	;	ENTREE E	2880	AUSR	EQD USR
0600	;		2920	IFORT	EQD AFORT
0640	;		2960	IFAIB	EQD AFAIB
0680	ANOFF	EQU C058	3000	INTER	SEI
0720	ANONN	EQU C059	3040		LDX LENT
0760	CONV	EQU C0C0	3080		LDA CONV+08
0800	FORT	EQU EB	3120		STA TFORT,Y
0840	FAIB	EQU ED	3160		LDA CONV+04
0880	AFAIB	EQU 4074 ;16500	3200		STA TFAIB,Y
0920	AFORT	EQU 4588 ;17800	3240		LDA PB2
0960	TFAIB	EQU 4A6A ;19050	3280		CMF #180
1000	TFORT	EQU 4A9C ;19100	3320		BCC FINT
1040	LENT	EQU 4001 ;16385	3360		LDA LENT
1080	NB	EQU 4002	3400		STA MEM
1120	MEM	EQU 4003	3440	FINT	INC LENT
1160	PB2	EQU C063	3480		RTI
1200	;		3520	AINTER	EQD INTER
1240	;	INCREMENTATION MIROIR	3560	;	
1280		ORG 4B00 ;19200	3600	DEBUT	SEI
1320	PAS4	LDX #104	3640		CLD
1360	BCL	JSR PASP	3680		LDA #100
1400		DEX	3720		STA CONV+01
1440		BNE BCL	3760		LDA #132
1480		RTS	3800		STA NB
1520	;		3840		LDA IFORT
1560	PASP	LDA ANOFF	3880		STA FORT
1600		LDY #190	3920		LDA IFORT+01
1640	BCL1	DEY	3960		STA FORT+01
1680		BNE BCL1	4000		LDA IFAIB
1720		LDA ANONN	4040		STA FAIB
1760		LDY #190	4080		LDA IFAIB+01
1800	BCL2	DEY	4120		STA FAIB+01
1840		BNE BCL2	4160		LDA AINTER
1880		RTS	4200		STA #03FE
1920	;	ACQUISITION DES VAL LENTILLES	4240		LDA AINTER+01
1960		ORG 4BC8 ;19400	4280		STA #03FF
2000		JMP DEBUT	4320	PNB	LDA #100
2040	USR	JSR #E10C	4360		STA LENT
2080		CLD	4400	PINT	CLI
2120		CLC	4440		LDA LENT
2160		LDA IFORT+01	4480		CMF #118
2200		ADC #A0	4520		BNE PINT
2240		STA FORT+01	4560		SEI
2280		CLC	4600		LDY #100
2320		LDA IFAIB+01			

4640		LDX MEM
4680	NOFIN	CPY £#18
4720		BNE SAUT
4760		LDX £#00
4800	SAUT	LDA TFAIB,Y
4840		STA (FAIB),Y
4880		LDA TFORT,Y
4920		STA (FORT),Y
4960		INX
5000		INX
5040		CPY £#18
5080		BNE NOFIN
5120		DEC NB
5160		BEO FIN
5200		JSR PAS4
5240		CLC
5280		LDA FAIB
5320		ADC £#18
5360		STA FAIB
5400		LDA FAIB+01
5440		ADC £#00
5480		STA FAIB+01
5520		CLC
5560		LDA FORT
5600		ADC £#18
5640		STA FORT
5680		LDA FORT+01
5720		ADC £#00
5760		STA FORT+01
5800		JMP RNB
5840	FIN	LDA AUSE
5880		STA #0B
5920		LDA AUSE+01
5960		STA #0C
6000		RTS
?		

LISTING DU PROGRAMME DE TRAITEMENT DES MESURES

```
10 REM COMPLET13
30 REM TRAITASTIG VERSION RAPIDE
40 REM TRAITEMENT DE L'ASTIGMATISME
50 REM *****
60 LCMEM: 21000
70 REM *** INITIALISATION ***
80 B$ = CHR$ (4): DIM
    A%(49,23),A(50),B(50),CC%(49),D(50),B%(5),C%(5),TF%(50):MO% = 50: DEF FN
    E(G) = ABS ( INT ((G / MO% - INT (G / MO%)) * MO% + .05) * SGN (G /
    MO%)): DEF FN F(H) = CC%( FN E(H)):PI = 2 * ATN (1E20)
90 N% = 49:D% = 159:O = (2 * PI) / 50:EP = 1E - 19:P = 1E - 4:S% = 30000:T% =
    100:U = 10
100 TEXT : HOME : INPUT "ETUDE SUR COURBE INTERMEDIAIRE MEMORISE, DIRECTE ?
    ";C$: IF C$ = "I" OR C$ = "M" OR C$ = "D" GOTO 120
110 GOTO 100
120 IF C$ = "I" GOTO 1800
130 INPUT "AFFICHAGE DES RESULTATS INTERMEDIAIRES (O,N) ? ";D$: IF D$ = "O" OR
    D$ = "N" GOTO 150
140 GOTO 130
150 IF C$ = "M" THEN GOSUB 490: REM RAPPEL SUR DISQUE
160 IF C$ = "D" THEN GOSUB 540: REM ACQUISITION SUR BANC
170 REM -----
180 REM V NUMERO DE L'AXE ETUDIE
190 FOR V = 0 TO N%:Q% = 1: GOSUB 1180
200 IF CC%(V) = S% OR CC%(V) = - 800 OR CZ%(V) = 1400 GOTO 220
210 GOSUB 1090: GOSUB 880
220 GOSUB 270: NEXT V
230 GOTO 1560
240 REM *****
250 REM -----
260 REM *****
270 IF D$ = "N" GOTO 370: REM TRACE DES TROIS COURBES
280 G1 = 53: GOSUB 660: GOSUB 710: GOSUB 760
290 G = 9.5 + CC%(V) / T%:G = G * 10: IF G > = 0 AND G < 255 THEN HPLOT G,159
    TO G,0
300 G = MM% * 10 + .5: IF G > = 0 AND G < 255 THEN HPLOT G,130 TO G,159
310 FOR I = 0 TO 2:G = B%(I) + .5:G = G * 10
320 IF G > 1 AND G < 254 THEN HPLOT G - 1,50 TO G + 1,0
330 NEXT I
340 VTAB 21: IF CC%(V) = S% THEN PRINT " ERREUR... ": GOTO 360
350 PRINT "LENTILLE = ";CZ%(V) / T%;" D.";
360 PRINT "V=";V: INPUT "SUIVANTE OU (C) ? ";E$: IF E$ = "C" THEN D$ = "N"
370 RETURN
380 REM *****
390 REM MEMORISATION
400 INPUT " MEMO: DIOPT. TOUT SORTIE ? ";E$: IF E$ = "D" OR E$ = "T" OR E$
    = "S" GOTO 420
410 GOTO 400
420 IF E$ = "S" GOTO 100
430 INPUT "NOM FICHER";G$
440 IF E$ = "D" GOTO 460
450 E$ = G$: PRINT B$;"OPEN ";E$: PRINT B$;"DELETE ";E$: PRINT B$;"OPEN ";E$:
    PRINT B$;"WRITE ";E$: FOR V = 0 TO N%: FOR G = 0 TO 23: PRINT A%(V,G): NEXT
```

```
NEXT : NEXT : PRINT B$;"CLOSE ";E$
460 E$ = G$ + ".DI": PRINT B$;"OPEN ";E$: PRINT B$;"DELETE ";E$: PRINT B$;"OPEN
";E$: PRINT B$;"WRITE ";E$: FOR V = 0 TO N%: PRINT CC%(V): NEXT : PRINT
B$;"CLOSE ";E$: GOTO 100
470 REM *****
480 REM RAPPEL VALEURS SUR DISQUE
490 INPUT "NOM FICHER (REFUSE: R) ";E$: PRINT B$;"OPEN ";E$: PRINT B$;"READ
";E$: FOR V = 0 TO N%: FOR G = 0 TO 23: INPUT A%(V,G): NEXT : NEXT : PRINT
B$;"CLOSE ";E$: VTAB 21: INPUT "TRACE DES COURBES (O - N) ";E$: IF E$ = "N"
GOTO 510
500 G1 = 159: FOR V = 0 TO N%: GOSUB 660: VTAB 21: PRINT "NUM. ";V: NEXT V
510 RETURN
520 REM *****
530 REM ACQUISITION SUR BANC
540 PRINT "BLOADACQRAP-ASS"
550 PRINT " ": CALL 19400: PRINT " "
560 K% = 24:V% = 0:G% = 0
570 J% = (V% * K%) + G%
580 A%(V%,Z%) = USR (J%)
590 Z% = G% + 1: IF Z% < 24 GOTO 570
600 Z% = 0: GOTO 620
610 IF D$ = "O" THEN G1 = 159: GOSUB 660: VTAB 23: PRINT "NUM. ";V%
620 V% = V% + 1: IF V% < N% + 1 GOTO 570
630 RETURN
640 REM REM*****
650 REM TRACE COURBE ORIGINE
660 HGR : HCOLOR= 3:H1 = G1 / 4095: FOR G = 0 TO 23:I1 = D% - (A%(V,G) * H1)
670 IF I1 > 0 AND I1 < 160 THEN HPLOT 10 * G,I1 TO 10 * (G + 1),I1
680 NEXT : RETURN
690 REM *****
700 REM TRACE DES AMPLITUDES 21 VALEURS
710 H1 = 53 / 16000: FOR G = 2 TO 22:I1 = 107 - (H1 * A(G))
720 IF I1 > 0 AND I1 < 160 THEN HPLOT 10 * G,I1 TO 10 * (G + 1),I1
730 NEXT : RETURN
740 REM *****
750 REM TRACE DES DERIVEES 21 VALEURS
760 HPLOT 0,27 TO 255,27:H1 = 27 / 4000: FOR G = 2 TO 22:I1 = 27 - (H1 * B(G))
770 IF I1 > 0 AND I1 < 160 THEN HPLOT 10 * G,I1 TO 10 * (G + 1),I1
780 NEXT : RETURN
790 REM *****
800 REM == LIGNES 2000 ==
810 REM CALCUL DERIVEES POUR V%( )
820 H = Q% + DD%:A(H) = 0:B(H) = 0: FOR G = - Q% TO Q%:A(H) = A(H) + A%(V,H +
G):B(H) = B(H) + (G * A%(V,H + G)): NEXT G
830 FOR G = DD% + Q% + 1 TO DF% - Q%:A(G) = A(G - 1) + A%(V,G + Q%) - A%(V,G -
Q% - 1)
840 B(G) = B(G - 1) - A(G - 1) + (Q% * (A%(V,G + Q%) + A%(V,G - Q% - 1))) +
A%(V,G - Q% - 1): NEXT G
850 RETURN
860 REM *****
870 REM CALCUL DE DI(PAS)
880 GOSUB 1020
890 IF B1 < 0 AND B2 > 0 GOTO 910
900 PRINT "ERREUR INTERSECTION ":CC%(V) = S%: RETURN
910 R1 = (A2 - A1) / (B1 - B2):R1 = R1 - 9:F% = R1 * T%:CZ%(V) = F%: RETURN
920 REM *****
930 REM REGRESSION LINEAIRE DE FORME Y=A+BX; PENIES E1 F1; ABCISES O1 V1
940 REM Q1 NOMB DE POINTS
950 REM U1 DEBUT CALCUL
```

```
960 IF Q1% < 1 THEN Q1% = 1
970 W1 = 0:X1 = 0:Y1 = 0:Z1 = 0: FOR G = U1% TO U1% + Q1%:W1 = W1 + G:X1 = X1 +
  A%(V,G): NEXT :W1 = W1 / (Q1% + 1):X1 = X1 / (Q1% + 1)
980 FOR G = U1% TO U1% + Q1%:Z1 = Z1 + (G - W1) ^ 2:Y1 = Y1 + (G - W1) *
  A%(V,G): NEXT :B = Y1 / Z1:A = X1 - B * W1
990 RETURN
1000 REM *****
1010 REM CALCUL DES DEUX PENTES
1020 Q1% = 3:U1% = MM% - Q1%: IF U1% < 1 THEN U1% = 1:Q1% = MM% - U1%
1030 GOSUB 960:A1 = A:B1 = B
1040 Q1% = 3:U1% = MM% + 1: IF U1% + Q1% > 23 THEN Q1% = 23 - U1%
1050 GOSUB 960:A2 = A:B2 = B
1060 RETURN
1070 REM *****
1080 REM VERIF SI ORIGINE COURBES BONNES
1090 FOR F = MM% - 1 TO MM% + 1: IF A%(V,F + 1) < = A%(V,F - 1) THEN DI% = F
1100 NEXT F
1110 IF DI% = 22 THEN DI% = 21
1120 MM% = DI%
1130 RETURN
1140 REM *****
1150 REM RECHERCHE MIN PAR ITERATIONS
1160 REM B%( ) VALEUR DE H
1170 REM C%( ) SIGNE DE LA VARIATION DE DERIVES
1180 CC%(V) = 0:Q% = 4:DD% = 1:DF% = 23
1190 IF DD% > 23 - (2 * Q%) - 1 THEN DD% = MD%
1200 IF DF% < DD% + (2 * Q%) + 1 THEN DF% = MF%
1210 GOSUB 820:J% = 0: FOR H = 0 TO 2:B%(H) = 0:C%(H) = 0: NEXT : FOR H = DD% +
  Q% TO DF% - Q% - 1
1220 IF J% > 3 GOTO 1250
1230 IF B(H) * B(H + 1) > 0 OR B(H) = 0 GOTO 1250
1240 B%(J%) = H:C%(J%) = SGN (B(H + 1) - B(H)):J% = J% + 1
1250 NEXT H
1260 MD% = DD%:MF% = DF%
1270 IF Q% = 1 GOTO 1420
1280 IF J% = 0 THEN Q% = Q% - 1: GOTO 1190
1290 IF J% > 3 GOTO 1530
1300 IF Q% = 4 THEN Q% = 3: GOTO 1320
1310 Q% = 1
1320 IF J% < > 1 GOTO 1360
1330 IF C%(0) = 1 GOTO 1420
1340 IF B%(0) < 23 / 2 THEN DD% = DD%:DF% = B%(0): GOTO 1190
1350 DD% = B%(0):DF% = DF%: GOTO 1190
1360 IF J% < > 2 GOTO 1390
1370 IF C%(0) = 1 THEN DD% = DD%:DF% = B%(1): GOTO 1190
1380 DD% = B%(0):DF% = DF%: GOTO 1190
1390 IF C%(1) = - 1 GOTO 1530
1400 DD% = B%(0):DF% = B%(2): GOTO 1190
1410 REM -----
1420 IF J% = 0 GOTO 1480
1430 IF J% = 1 AND C%(0) = - 1 GOTO 1480
1440 H = 0: REM ON RECHERCHE TQ C%(H)=-1
1450 IF H = 2 GOTO 1530
1460 IF C%(H) < > 1 THEN H = H + 1: GOTO 1450
1470 MM% = B%(H): GOTO 1510
1480 IF DD% = 1 THEN PRINT "DI<-8 D.":CC%(V) = - 800: GOTO 1510
1490 IF DF% = 23 THEN PRINT "DI>14 D.":CZ%(V) = 1400: GOTO 1510
1500 GOTO 1530
1510 RETURN
```

```
1520 REM *****
1530 PRINT "ERREUR MIN":CC%(V) = S%: GOSUB 270: RETURN
1540 REM *****
1550 REM RECONSTRUCTION IMAGE DES DIOPTRIES
1560 HGR :F$ = "A": GOSUB 1680: INPUT " ";A$
1570 GOSUB 2040
1580 GOSUB 2300
1590 GOSUB 1630:F$ = "A": GOSUB 1680
1600 GOTO 2510
1610 REM *****
1620 REM TRACE DE LA MIRE
1630 HGR : HCOLOR= 3: HPLLOT 0,80 TO 255,80: HPLLOT 130,0 TO 130,159:F$ = "C":
FOR J = - 4 TO 4:J1 = .3: IF J = 0 THEN J1 = .1
1640 FOR G = 0 TO 2 * PI STEP J1:R = J: GOSUB 1730: NEXT : NEXT : RETURN
1650 REM *****
1660 REM TRACE COURBE INITIALE
1670 REM I ROTATION; R AMPLITUDE
1680 FOR J = 0 TO N%: IF CC%(J) = S% GOTO 1700
1690 G = O * J:R = CZ%(J) / T%: GOSUB 1730
1700 NEXT : RETURN
1710 REM *****
1720 REM TRACEDES POINTS CALCULES EN DIOPTRIES
1730 R = 40 + (R * 8):X = R * SIN (G):X = 130 + X:Y = R * COS (G):Y = 80 - Y:
IF X < 0 OR X > 255 OR Y < 0 OR Y > 159 GOTO 1770
1740 IF F$ = "C" THEN HPLLOT X,Y: GOTO 1770
1750 IF F$ = "P" THEN HPLLOT X,Y TO X + 1,Y TO X,Y + 1 TO X + 1,Y + 1
1760 IF F$ = "A" THEN HPLLOT X - 1,Y TO X + 1,Y: HPLLOT X,Y - 1 TO X,Y + 1
1770 RETURN
1780 REM *****
1790 REM RAPPEL VALEURS DIOPTRIES
1800 INPUT "FICHER ?";E$: PRINT B$;"OPEN ";E$: PRINT B$;"READ ";E$: FOR V = 0
TO N%: INPUT CZ%(V)
1810 NEXT V: PRINT B$;"CLOSE ";E$
1820 GOTO 1560
1830 REM *****
1840 REM TRAITEMENT VOISINS EGAUX
1850 D1 = ABS ( FN F(H%) - FN F(H% - 1)):K1 = ABS ( FN F(H%) - FN F(H% +
1)):L1 = ABS ( FN F(H% + 25) - FN F(H% - 1 + 25)):M1 = ABS ( FN F(H% +
25) - FN F(H% + 1 + 25))
1860 IF D1 + K1 < L1 + M1 THEN CC%( FN E(H% * 25)) = FN F(H%): GOTO 1890
1870 IF D1 + K1 = L1 + M1 GOTO 1900
1880 CZ%( FN E(H%)) = FN F(H% + 25)
1890 RETURN
1900 IF ABS (D1 - K1) < ABS (L1 - M1) THEN CC%( FN E(H% + 25)) = FN F(H%):
GOTO 1890
1910 CC%( FN E(H%)) = FN F(H% + 25): GOTO 1890
1920 REM *****
1930 REM ROUTINE M-->
1940 D1 = ABS ( FN F(M%) - FN F(M% + 1)):K1 = ABS ( FN F(M% + 25) - FN F(M%
+ 1 + 25)): IF D1 < K1 THEN CC%( FN E(M% * 1 + 25)) = FN F(M% + 1): GOTO
1960
1950 CC%( FN E(M% + 1)) = FN F(M% + 1 + 25)
1960 RETURN
1970 REM *****
1980 REM ROUTINE <--L
1990 D1 = ABS ( FN F(L%) - FN F(L% - 1)):K1 = ABS ( FN F(L% + 25) - FN F(L%
- 1 + 25)): IF D1 < K1 THEN CZ%( FN E(L% - 1 + 25)) = FN F(L% - 1): GOTO
2010
2000 CZ%( FN E(L% - 1)) = FN F(L% - 1 + 25)
```



```
2010 RETURN
2020 REM *****
2030 REM ROUTINE PRINCIPALE DE COMPARAISON ENTRE SYMETRIQUES
2040 H% = 0: VTAB 23
2050 IF H% > = 25 THEN RETURN
2060 N1 = 0:P1 = 0
2070 IF ABS ( FN F(H%) - FN F(H% + 25)) = < U THEN H% = H% + 1: GOTO 2050
2080 IF ABS ( FN F(H% - 1) - FN F(H% - 1 + 25)) = < U AND ABS ( FN F(H% +
1) - FN F(H% + 1 * 25)) = < U THEN GOSUB 1850:H% = H% + 2: GOTO 2050
2090 REM -----RECHERCHE <--M PLUS PROCHE
2100 M% = H% - 1
2110 IF M% = H% THEN PRINT "ERREUR DANS M": GOTO 190
2120 IF FN F(M%) = S% AND FN F(M% * 25) = S% THEN N1 = M%: GOTO 2150
2130 IF ABS ( FN F(M%) - FN F(M% + 25)) > U THEN M% = M% - 1: GOTO 2110
2140 REM -----RECHERCHE L--> PLUS PROCHE
2150 L% = H% + 1
2160 IF L% = H% THEN PRINT "ERREUR DANS L": GOTO 190
2170 IF FN F(L%) = S% AND FN F(L% + 25) = S% THEN P1 = L%: GOTO 2200
2180 IF ABS ( FN F(L%) - FN F(L% + 25)) > U THEN L% = L% * 1: GOTO 2160
2190 REM -----TRAITEMENT ENTRE EGAUX
2200 Q1 = L%: IF N1 = M% AND P1 = L% THEN H% = L% + 1: GOTO 2050
2210 IF P1 < > L% AND N1 < > M% GOTO 2240
2220 IF P1 < > L% THEN G = L%: FOR L = G TO N1 - 1 STEP - 1:L% = L: GOSUB
1990: NEXT L: GOTO 2270
2230 G = M%: FOR M = G TO P1 - 1:M% = M: GOSUB 1940: NEXT M: GOTO 2270
2240 GOSUB 1940:M% = M% * 1: GOSUB 1990:L% = L% - 1: IF FN E(L% - M%) = 1 GOTO
2270
2250 IF FN E(L% - M%) < > 2 GOTO 2240
2260 H% = M% + 1: GOSUB 1850
2270 H% = Q1: GOTO 2050
2280 REM *****
2290 REM INTERPOLATION DES COUPLES DE 255
2300 H% = 0:C = 0
2310 IF FN F(H% + 1) < > S% GOTO 2380
2320 IF FN F(H%) = S% GOTO 2380
2330 Q1 = H%
2340 C = C * 1:H% = H% + 1: IF FN F(H%) < > S% GOTO 230
2350 IF FN F(H% + 1) = S% GOTO 2340
2360 IF C > 8 THEN PRINT "ERREUR TROP DE 255": GOTO 190
2370 C = C + 1:D1 = FN F(H% + 1) - FN F(Q1):D1 = D1 / C: FOR G = Q1 * 1 TO
H%:CC%( FN E(G)) = D1 * FN F(G - 1):CC%( FN E(G + 25)) = CZ%( FN E(G)):
NEXT G
2380 H% = H% + 1: IF H% < 25 GOTO 2310
2390 RETURN
2400 REM *****
2410 PRINT "N= ";.1 * INT (Q1 * 10);" VAL= ";.1 * INT (R1 * .1);" D. ";:F$ =
"":R = R1 / T%:G = 0 - Q1: GOSUB 1730:S1 = X:T1 = Y:R = R1 / T%:G = 0 * (Q1
+ 25): GOSUB 1730: HPLOT S1,T1 TO X,Y
2420 RETURN
2430 REM *****
2440 REM THEORIQUE
2450 HOME : PRINT "X= A + B*SIN(AL)": PRINT : INPUT "A = ";A: INPUT "B = ";B:
INPUT "AL = ";ZU:B = B / 2:A = A - B: FOR G = 0 TO 49
2460 CC%(G) = A + (B * ( COS ((2 - (G - AL) * O)))):CC%(G) = CZ%(G) * T%: NEXT G
2470 GOSUB 1630:F$ = "A": GOSUB 1680: GOTO 190
2480 REM *****
2490 REM TRANSFORMES DE FOURIER
2500 REM NH%NOMBRE D'HARMONIQUES
2510 NN% = 12 * 2 + 1:CF = 2 / NN%: VTAB 23:NH% = 1: FOR K = 0 TO NN%:TF%(K) =
```

```
CC%(K): NEXT
2520 REM -----
2530 REM INITIALISATION
2540 CT = PI * CF:S1 = SIN (CT):C1 = COS (CT):CP = 1:SP = 0:P = 0
2550 F0 = TF%(0)
2560 U2 = 0:U1 = 0:M% = NN% - 1
2570 U0 = TF%(M%) + 2 * CP - U1 - U2:U2 = U1:U1 = U0:M% = M% - 1: IF M% > 0 THEN
2570
2580 A(P) = CF * (F0 + CP - U1 - U2):B(P) = CF * SP * U1: IF P > NH% GOTO 2600
2590 Q = C1 * CP - S1 * SP:SP = C1 - SP + S1 * CP:CP = Q:P = P + 1: GOTO 2560
2600 A(0) = .5 * A(0)
2610 REM -----
2620 REM AFFICHAGE
2630 PRINT "COEFFICIENTS FOURIER": FOR K = 0 TO NH%: PRINT "A(";K;")= ";A(K);"
B(";K;")= ";B(K): NEXT K
2640 REM -----
2650 PRINT "INTERPOLATION": FOR K = 0 TO NN% * 2 - 1: GOSUB 2740:CZ%(K) = SS:
NEXT K:F$ = "P": GOSUB 1680
2660 VTAB 23:AL = .5 - ATN (B(1) / (EP + A(1))):B = A(1) / (EP + COS (2 *
AL))
2670 IF B < 0 THEN AL = ZU + PI / 2:B = - B
2680 IF AL < 0 THEN AL = AL + PI
2690 Q1 = AL / O:A = A(0):A = A + B:B = B * 2: PRINT "SP= ";.1 * INT (A - .1);"
CYL= ";.1 * INT (B * .1);" ANG= ";.1 * INT (ZU * 1800 / PI);" DEG"
2700 K = Q1: GOSUB 2740:R1 = SS: GOSUB 2410:Q1 = Q1 + 12.5:K = Q1: GOSUB 2740:R1
= SS: GOSUB 2410
2710 GOTO 400
2720 REM *****
2730 REM VALEUR COURBE APRES FOURIER
2740 X = (2 * PI - K) / (NN% * 1):SS = A(0): FOR L = 1 TO NH%:SS = SS + A(L) *
COS (X * L) + B(L) - SIN (X * L): NEXT L: RETURN
```

A N N E X E - 6

CARTE D'ACQUISITION ANALOGIQUE-NUMERIQUE

Développée au centre de technologie biomédicale INSERM de Lille, cette carte permet de convertir 16 voies simples ou 8 voies différentielles sélectionnées par programme (ref. 21).

Caractéristiques.

Temps d'acquisition de 18 micro - secondes.

Temps de conversion sur 12 bits de 28 micro - secondes, déclenchée par :

- horloge interne réglable de 500 Hz à 32 kHz par division du signal d'horloge de l'Apple.
- événement extérieur (NMI).
- logiciel.

La détection de fin de conversion peut être obtenue par :

- interruption masquable (IRQ).
- en testant le bit d'état du buffer de sortie.

Les résultats sont transférés dans des mémoires tampons adressées par programme.

C0C1 : adresse de la sélection de voie.

C0C2 : adresse correspondant à la demande de conversion.

C0C4 : adresse des poids forts de l'acquisition.

C0C8 : adresse des poids faibles de l'acquisition.

