

# CONTRIBUTION À LA MESURE DES BINAIRES VISUELLES AU MOYEN DE LA CAMERA ÉLECTRONIQUE LALLEMAND

P. LAQUES

*Observatoire du Pic-du-Midi et de Toulouse, France*

## 1. Introduction

En 1961, au cours du Symposium IAU sur ce même sujet, M. Rösch avait déjà annoncé l'intérêt que pourrait présenter l'utilisation d'un convertisseur d'image de type Lallemand pour la photographie des étoiles doubles. Des essais prometteurs avaient déjà été faits sur le réflecteur de 60 cm du Pic-du-Midi. Depuis, et surtout à partir de 1965, un programme a été poursuivi, au moyen du nouveau réflecteur de 106 cm de cet Observatoire. Plus d'une centaine de plaques ont pu être prises. Ce sont l'exposé de cette nouvelle méthode photographique, et les résultats des mesures obtenues, que nous avons l'intention d'aborder ici.

Ce n'est pas la première fois que l'on fait des mesures photographiques d'étoiles doubles. Cette méthode, mise au point par Hertzsprung en 1920 [1] a été utilisée par de nombreux auteurs. Lorsqu'on examine les divers catalogues de mesures photographiques, on constate que le matériau observationnel se limite à des étoiles dont la distance angulaire est supérieure à 2" arc. Ce sont donc, la plupart du temps, des étoiles de période trop grande pour être très intéressantes à la détermination des masses. Le gain en précision et en objectivité obtenu au moyen de cette méthode n'est donc pas bien exploité.

## 2. Raisons de la limitation de la méthode photographique classique

Soit  $\Sigma$  la surface d'onde de la lumière venant d'une étoile  $E$  et tombant sur un instrument de surface  $S$ . Nous obtenons, au plan focal  $P$  de l'instrument, l'image de  $E$ , c'est-à-dire d'un point à l'infini.

Avant de parvenir à  $S$ , la lumière a dû traverser l'atmosphère terrestre, c'est-à-dire un milieu gazeux, de densité variable tout au long de son parcours. Dans ces conditions, l'image obtenue dans le plan  $P$  est liée à l'état de cette atmosphère durant la pose photographique. Soit  $\Delta t$  ce temps.

(1) Si, durant  $\Delta t$ , quelle que soit sa valeur, l'atmosphère est restée parfaitement calme ( $\Sigma$  parfaitement plan), nous obtenons en  $P$  une tache d'Airy parfaite, dont le diamètre du noyau central est  $d$  (qui définit le pouvoir séparateur théorique de l'instrument).

(2) Supposons, au contraire, que durant  $\Delta t$ , l'atmosphère ait présenté des inhomogénéités de densité. Nous distinguerons alors deux cas :

(2.1) –  $\Delta t$  est assez court pour que l'atmosphère, bien qu'inhomogène, se soit peu modifié pendant ce temps. Nous obtenons alors une image de 'forme' quelconque,

qui est l'image de diffraction instantanée donnée par l'instrument et modifiée par l'opérateur 'turbulence'. Nous pouvons définir, sur un ensemble d'images instantanées, un diamètre moyen d'images  $\bar{\delta}$  (lié à l'état moyen de l'atmosphère durant cette période).

(2.2) –  $\Delta t$  est assez grand pour intégrer l'opérateur 'turbulence'. Comme la turbulence est un effet essentiellement aléatoire (en l'absence de tout effet systématique instrumental), l'intégration des images instantanées selon  $\Delta t$  fournit une image résultante, de symétrie gaussienne; soit une tache circulaire de diamètre  $D$ .

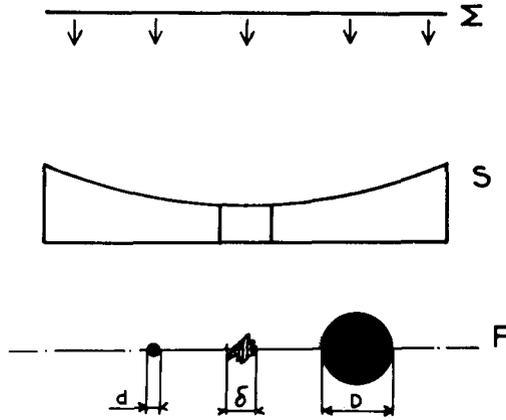


Fig. 1.

On sait que le cas (1) a très peu de chances de se produire. La photographie classique exploite essentiellement le cas (2.2). Par son gain en temps de pose, la photographie électronique permet de tirer les avantages, au moins pour les étoiles de magnitude inférieure à 10, du cas (2.1).

Les conséquences sont alors les suivantes:

(a) en moyenne, on doit avoir

$$d < \bar{\delta} < D,$$

d'où il résulte une probabilité de gain de résolution pour le cas (2.1) par rapport au cas (2.2).

(b) dans le cas (2.1), l'image de diffraction instantanée a, la plupart du temps, un aspect de 'grappe de raisin', c'est-à-dire qu'elle est formée de condensations de dimensions de l'ordre de grandeur de la tache d'Airy théorique (Rösch) [2]. Cet effet est d'autant plus vrai que le temps d'intégration est plus court.

La photographie instantanée des images stellaires permet donc de diminuer statistiquement la limite de résolution résultante obtenue dans la technique photographique des étoiles doubles. De plus, en utilisant la structure instantanée des images de diffraction, elle doit permettre des mesures avec une précision proche de celle du pouvoir instrumental théorique (précision maximum).

Dans ces conditions, la méthode d'exploitation des images stellaires doit être

adaptée à ces nouvelles données. En effet, dans la méthode classique, elle consiste à mesurer la distance de deux images parfaitement circulaires (Strand) [3]. Dans notre cas, nous obtenons des images pouvant prendre des formes à priori quelconques.

### 3. Principe de mesure astrométrique d'étoiles doubles à partir d'images instantanées

Rösch [4] a montré comment, dans le cas d'étoiles doubles serrées, la photographie instantanée permet de mettre en évidence des structures semblables dans les images de diffraction des deux composantes de cette étoile. Ce phénomène, connu des observateurs visuels, démontré par la théorie, est confirmé de façon remarquable par les milliers d'images stellaires déjà enregistrées. Rappelons qu'il est d'autant plus vrai que les étoiles sont plus serrées.

C'est sur ce principe qu'est basée la méthode de mesure du couple. D'une façon générale, elle consiste à déterminer la distance de deux images de forme quelconque mais semblables.

Une technique avait été mise au point par Rösch en 1961. Celle-ci est décrite dans [4]. Depuis, nous avons mis au point une autre méthode par superposition d'isophotes, décrite dans [5].

Les mesures présentées ici ont été effectuées des deux façons suivantes :

(1) Pour les étoiles de faible  $\Delta m$ , en mesurant au moyen d'un microscope et d'un micromètre à fil, la distance d'une ou plusieurs condensations homologues des images des deux composantes.

(2) Lorsque le  $\Delta m$  risquait d'introduire un effet systématique de magnitude, nous avons fait une analyse densitométrique des images et effectué la mesure suivant la méthode de superpositions des isophotes indiquée ci-dessus.

### 4. Échelle des clichés

La détermination de l'échelle des clichés est nécessaire pour exprimer les mesures de distance en seconde d'arc. Elle doit être faite à chaque nuit d'observation.

Celle-ci est obtenue au moyen d'un collimateur auxiliaire (Figure 2).

Sur le côté du télescope, un tube  $T$  porte une lentille  $L$  au plan focal de laquelle est placée une grille  $G$ , de pas bien connu et éclairée par une source  $E$ . Celle-ci est constituée par une lampe à vapeur de mercure, suivie d'un filtre centré sur la raie verte. Deux miroirs,  $M_1$  et  $M_2$ , renvoient la lumière vers le miroir du télescope.

$L$  forme une image de  $G$  à l'infini. Le télescope, mis au point sur les étoiles, forme donc une image de  $G$  au niveau plaque  $P'$  du récepteur.

Soient :  $f$  distance focale du collimateur  $T$ ;  $p$  pas de la grille  $G$ ;  $x$  pas de l'image de la grille en  $P'$ ; et  $F$  distance focale du télescope au plan  $P'$ .

Nous avons la relation simple

$$\frac{F}{f} = \frac{x}{p}, \quad (1)$$

$p$  et  $f$  étant très bien connus, la précision est donc uniquement liée à la précision de la mesure de  $x$ .

Le contraste de la grille est de 1, et la largeur des traits brillants est de  $20\ \mu$ . Le télescope en donne une image limitée par l'ouverture du collimateur, qui joue le rôle de diaphragme. Chaque trait de la grille donne, en  $P'$ , une image qui serait celle d'une fente très fine, non résolue par l'instrument. L'image obtenue en  $P'$  est donc l'image

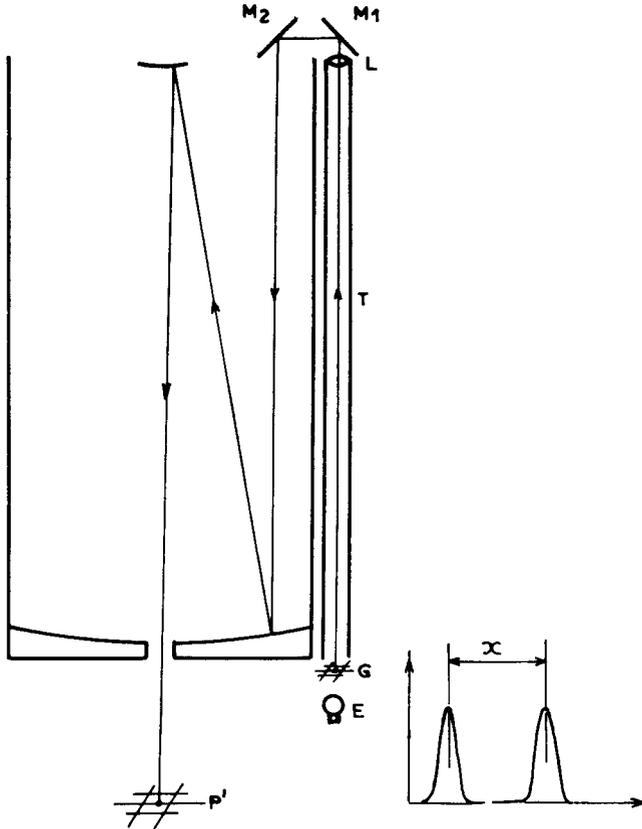


Fig. 2.

de diffraction d'un réseau de traits fins de pas connu.  $x$  est alors obtenu en mesurant la distance des axes des profils densitométriques de deux traits (Figure 2). On effectue une série de mesures de  $x$  afin d'améliorer la précision. Celles-ci doivent être systématiquement corrigées de la distorsion introduite par l'optique électronique, comme je l'indique plus loin.

La précision sur la mesure de  $x$  est de l'ordre de  $0,20\ \%$ . Est-ce à dire que celle sur  $F$  est de cet ordre de grandeur? Il peut se faire que le collimateur introduise des défauts parasites (difficulté de centrage, astigmatisme introduit par les miroirs  $M_1$  et  $M_2$ ). On peut dire que l'erreur ainsi introduite est probablement inférieure à  $1\ \%$ . Une étude

systematique des résidus des mesures d'étoiles doubles doit permettre de mettre en évidence un tel effet, s'il existe. Dès à présent, on constate, comme je l'indiquerai lors de l'analyse des résultats, qu'il est négligeable.

### 5. Distorsion de l'optique électronique

On sait qu'une optique électronique à focalisation électrostatique est un système centré qui en possède les diverses aberrations. L'une des plus importantes est la distorsion centre-bord; les mesures astrométriques en sont affectées. Il est donc nécessaire de la corriger.

La distorsion des optiques électroniques de type Lallemand ont été bien étudiées

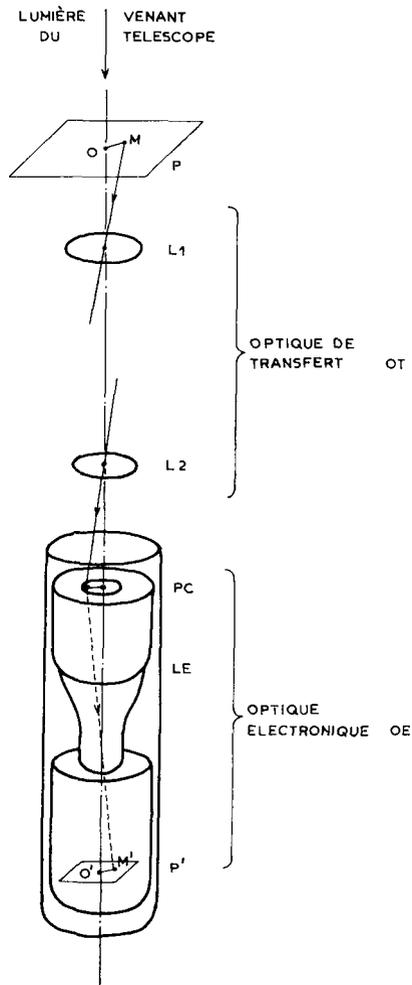


Fig. 3.

par Wlerick et Duchesne [6] et [7]. Nous nous sommes inspirés de leurs résultats dans le développement de notre technique de correction.

### 5.1. DISTORSION DE L'ENSEMBLE OPTIQUE DE TRANSFERT – OPTIQUE ÉLECTRONIQUE

Dans la pratique, la caméra électronique est montée sur le télescope par l'intermédiaire d'une optique de transfert  $OT$  qui a pour but, d'une part de conjuguer le plan émissif de la photocathode avec le plan focal du télescope, et d'autre part d'introduire un grandissement afin de porter la distance focale globale aux environs de 30 mètres. Le réglage optique et le centrage de la caméra par rapport à l'axe optique du télescope se font à l'aide d'un viseur latéral auxiliaire (Figure 3).

Nous utiliserons, les notations suivantes:  $P$  plan focal Cassegrain du télescope;  $PC$  plan de la face émettrice de la photocathode;  $P'$  plan de la plaque électrographique;  $L_1$  et  $L_2$  objectifs de  $OT$ , conjuguent les plans  $P$  et  $PC$ ; et  $LE$  lentille électrostatique conjuguant les plans  $PC$  et  $P'$ .

Dans la suite du calcul, nous considérerons  $P$  comme plan objet, et  $P'$  comme plan image de l'ensemble  $OT+OE$ .

Soient:  $O$  centre du champ en  $P$ ;  $y$  distance d'un point  $M$  de  $P$  à  $O$ .,  $y = OM$ ;  $O'$  centre du champ en  $P'$ ;  $x$  distance d'un point  $M'$  de  $P'$ , à  $O'$ ,  $x = O'M'$ ;  $g$  grandissement moyen radial  $g = x/y$ ; et  $g_0$  grandissement moyen radial au centre du champ.

On peut montrer que  $g$  s'écrit

$$g = g_0 + D(by^2 + cy^4), \quad (2)$$

où  $b$  et  $c$  sont des constantes qui ne dépendent que de la géométrie de l'optique électronique, et  $D$  une constante qui dépend des grandissements de l'optique de transfert et de l'appareil à mesurer.

Nous faisons systématiquement une mesure de distorsion par série de 12 clichés pris

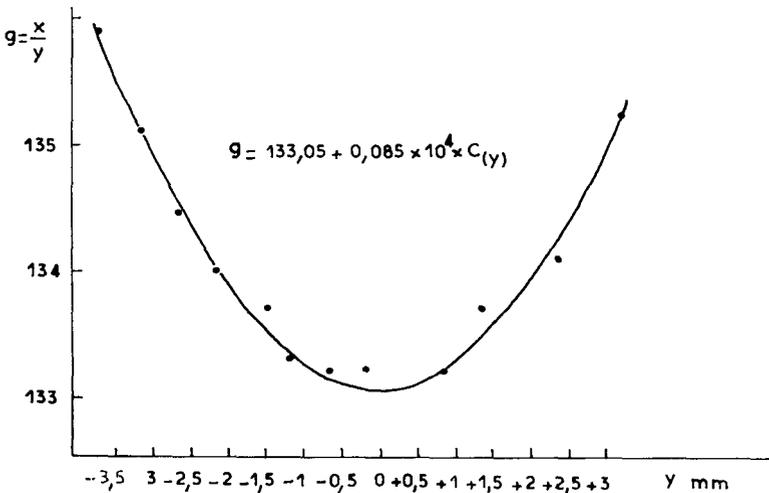


Fig. 4.

au cours d'une même nuit. Celle-ci est effectuée en prenant une photographie d'une grille de pas bien connue, placée dans le plan  $P$ . Nous paramétrons les points observés par une courbe d'équation (2).

La figure 4 montre un exemple d'une telle courbe. On peut constater que

$$\frac{g(\text{bord du champ})}{g_0} = 2\%.$$

La symétrie par rapport au centre est bien observée.

5.2. CORRECTION DE DISTORSION

La correction de distorsion porte sur deux séries de mesures:

5.2.1. Cas de deux points éloignés sur le champ du cliché

Soit  $AB$  un segment à mesurer sur le plan image  $P'$ .  $AB$  est affecté par la distorsion. On doit calculer  $A'B'$ .

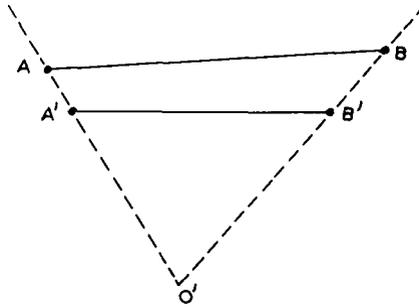


Fig. 5.

En supposant la distorsion isotrope, nous pouvons écrire

$$\begin{aligned} O'A &= g_A \cdot Oa & \text{et} & & O'A' &= g_0 \cdot Oa \\ O'B &= g_B \cdot Ob & \text{et} & & O'B' &= g_0 \cdot Ob \end{aligned}$$

$a$  et  $b$  étant les points objets du plan  $P$ , et  $g_A$  et  $g_B$  les grandissements moyens radiaux aux points  $A$  et  $B$ .

On peut encore écrire

$$\frac{O'A}{O'A'} = \frac{g_A}{g_0} \quad \text{et} \quad \frac{O'B}{O'B'} = \frac{g_B}{g_0},$$

et, d'après (2),

$$\frac{O'A}{O'A'} = \frac{g_0 + D \cdot C(y_A)}{g_0} \quad \text{et} \quad \frac{O'B}{O'B'} = \frac{g_0 + D \cdot C(y_B)}{g_0}.$$

En appelant  $C(y) = by^2 + cy^4$ ,

il en résulte

$$\left. \begin{aligned} \frac{O'A}{O'A'} &= 1 + \frac{D}{g_0} C(y_A), \\ \frac{O'B}{O'B'} &= 1 + \frac{D}{g_0} C(y_B), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

d'où l'on tire  $A'B'$  par résolution du triangle  $O'A'B'$ .

Cette résolution n'est pas très commode à faire. Une simplification apparaît si  $O'A$  est égal ou peu différent de  $O'B$ . Dans ce cas, en effet, on peut écrire

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{1}{2} \left( \frac{O'A}{O'A'} + \frac{O'B}{O'B'} \right). \quad (4)$$

Les équations (3) et (4) résolvent le problème et permettent de calculer  $A'B'$ , corrigé de la distorsion.

Cette correction est utilisée lors de la mesure de l'échelle des clichés astronomiques.

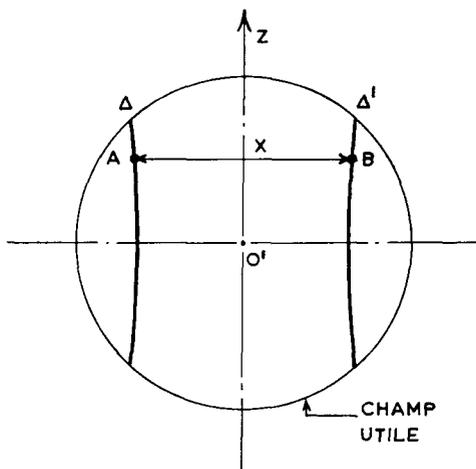


Fig. 6.

En effet, dans l'équation (1),  $x$  est la distance de deux traits et situés de part et d'autre du centre  $O'$  du champ.

Il suffit de s'arranger pour que les deux traits tombent à peu près de façon symétrique par rapport à  $O'$  pour qu'on puisse appliquer l'équation (4) et effectuer la correction.

Le graphique de la figure 7 donne les mesures de  $x$  en fonction de la distance  $z$  au centre du champ. Les points du haut représentent les mesures avant correction; ceux du bas représentent ceux après correction. Ils s'alignent alors selon une droite horizontale, aux erreurs de mesure près.

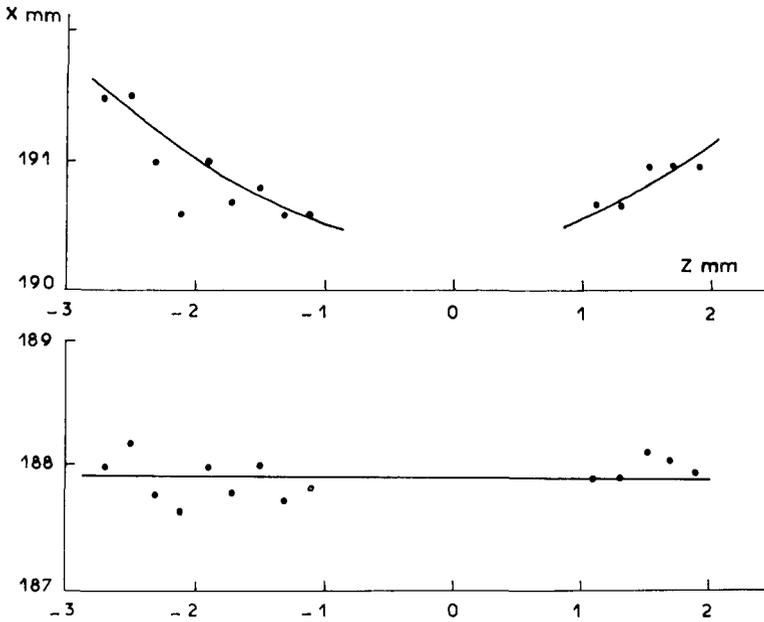


Fig. 7.

5.2.2. Cas de deux points proches dans le champ du cliché

C'est, bien entendu, le cas des deux composantes d'une étoile double visuelle.

Soit  $dl$  un petit segment situé en  $M$  du plan objet  $P$ , et  $dl'$ , son image en  $M'$  du plan image  $P'$ .

Soit  $\gamma$  le grandissement local au point  $M$ . En l'absence de distorsion,

$$\gamma = \frac{dl'}{dl} = Cte \quad \text{et} \quad \alpha = \beta.$$

En présence de distorsion, on doit écrire

$$\gamma = f(y) \quad \text{et} \quad \beta = \alpha + \varepsilon.$$

Mettons en évidence les valeurs de  $\varepsilon$  et  $\gamma$ .

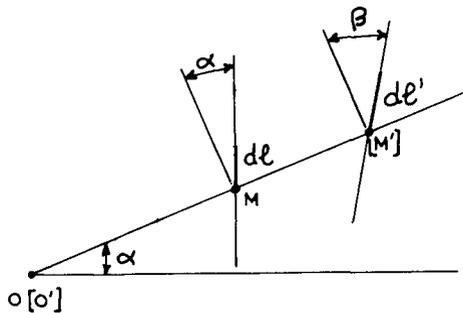


Fig. 8.

Soit

$$dx = \text{proj. } dl' \text{ sur } O'M' = dl' \sin \beta,$$

$$dy = \text{proj. } dl \text{ sur } OM = dl \sin \alpha.$$

Nous avons

$$\gamma = \frac{dl'}{dl} = \frac{dx \sin \alpha}{dy \sin \beta} = \gamma_r \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \gamma_r \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \varepsilon)},$$

où  $\gamma_r$  est le grandissement local radial.

$\varepsilon$  étant petit, on peut alors écrire

$$\gamma = \gamma_r (1 - \varepsilon \cotg \alpha).$$

D'après le calcul de Wlerick [6], on a

$$\varepsilon/D \simeq \sin 2\alpha (by^2 + 2cy^4)/g_0,$$

d'où l'on tire

$$\gamma = \gamma_r \left[ 1 - 2 \cos^2 \alpha (by^2 + 2cy^4) \frac{D}{g_0} \right].$$

Calculons  $\gamma_r = dx/dy$ . D'après (2), on peut écrire

$$x = g_0 y + D (by^3 + cy^5)$$

d'où

$$\gamma_r = g_0 + D (3by^2 + 5cy^4).$$

Posons, pour simplifier

$$A(y) = by^2 + 2cy^4,$$

$$B(y) = 3by^2 + 5cy^4.$$

En définitive, nous obtenons les deux systèmes d'équation

$$\gamma/g_0 = \left[ 1 + \frac{DB}{g_0} \right] \left[ 1 - 2 \cos^2 \alpha \frac{DA}{g_0} \right], \quad (6)$$

$$\varepsilon = \sin 2\alpha \frac{AD}{g_0} \quad \text{d'après (5)}. \quad (7)$$

Le terme  $\gamma/g_0$  de l'équation (6) permet de faire la correction en distance. En effet,

$$\frac{dl}{g_0} = \frac{g_0}{\gamma} dl' = dl' \frac{\gamma}{g_0};$$

$dl'$  est la mesure directe de la distance des étoiles sur le cliché;  $\gamma/g_0$  est le terme correctif qui est une fonction de  $y$  et de  $\alpha$ ;  $dl/g_0$  est la mesure corrigée à l'échelle du plan image  $P'$ .

L'équation (7) nous donne le terme correctif  $\varepsilon$  pour l'angle de position.

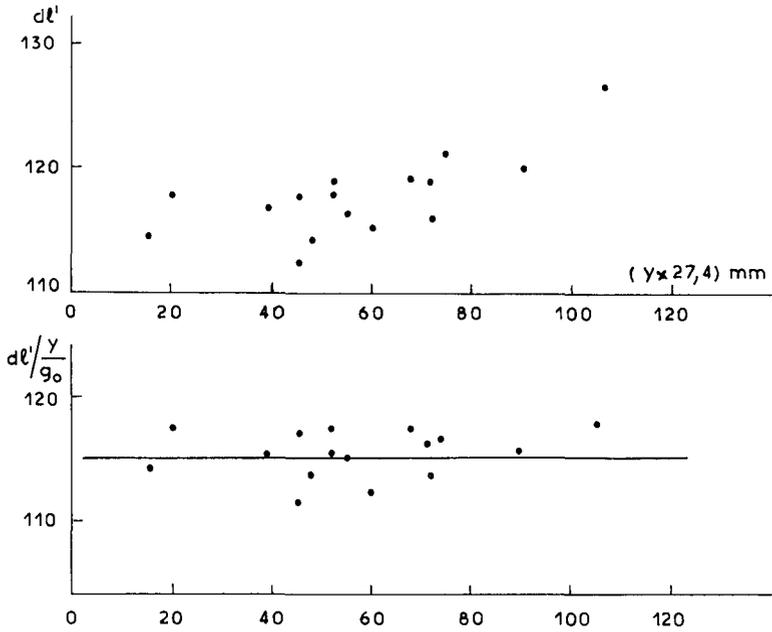


Fig. 9.

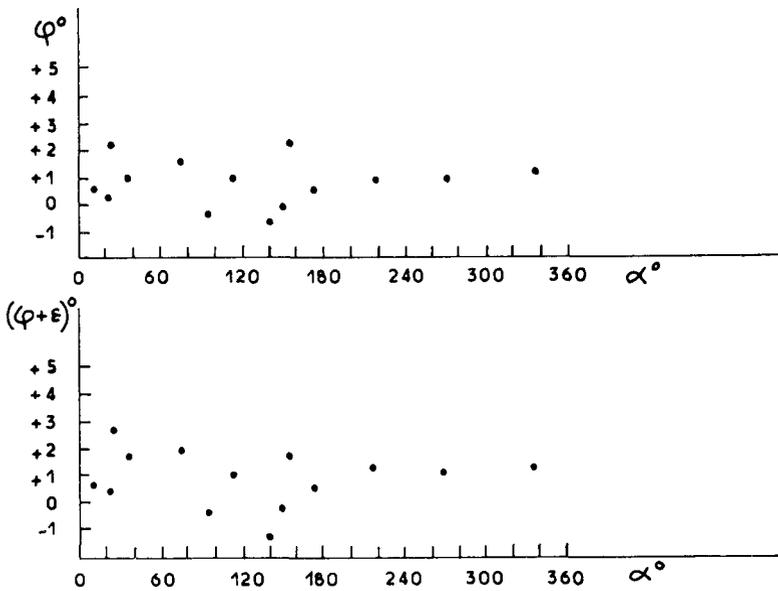


Fig. 10.

### 5.3. EXEMPLE DE CORRECTION DE DISTORSION SUR DES IMAGES DE L'ÉTOILE ADS 12 962

Sur le graphique de la figure 9 nous avons porté les mesures de distance (à l'échelle de l'appareil de mesure) en fonction de la distance au centre,  $y$ . Les points du haut sont les mesures sans correction de distorsion  $dl'$ . Elles font apparaître l'effet produit par la distorsion de l'optique électronique. Les points du bas, qui sont les mesures corrigées ( $dl'/(y/g_0)$ ) s'alignent bien suivant un axe horizontal.

Sur le graphique de la figure 10 nous avons porté les mesures d'angle de position  $\varphi$  (l'origine est ici la direction d'analyse du microdensitomètre, donc très proche de la direction des composantes de l'étoile) en fonction de l'angle  $\alpha$ . Les points du haut sont les mesures avant correction de distorsion; ceux du bas, après correction.

Nous pouvons souligner les points suivants:

(a) La correction sur l'angle de position n'apporte pas une amélioration très sensible dans la dispersion des mesures. La distorsion n'affecte pas beaucoup la position angulaire de l'image stellaire.

(b) Par contre, la distance est affectée de façon très nette. Il est donc nécessaire de la corriger de façon systématique.

(c) L'erreur sur le terme correctif, de l'ordre de 0,2%, est négligeable par rapport aux erreurs de mesures. Dans la mesure de distance en particulier, on constate que les points après correction ont la même dispersion moyenne qu'avant; seule, la concavité globale de la courbe avant correction est éliminée après.

En conclusion, on peut dire que la distorsion de l'optique électronique, quoiqu'importante, se corrige de façon assez satisfaisante pour que l'on puisse considérer qu'elle n'affecte pas les mesures astrométriques d'étoiles doubles.

## 6. Matériau observationnel

Comme je l'ai indiqué précédemment, la caméra électronique est montée sur le collecteur à l'aide d'une optique de transfert. Avant cette optique, se trouve un obturateur à disque à vitesse variable permettant d'obtenir des temps de pose jusqu'à la seconde. Un miroir réflexe situé sur l'obturateur permet d'examiner l'image avant la prise de vue. La cadence manuelle est de l'ordre de quelques secondes.

Les caractéristiques principales de la technique observationnelle sont les suivantes:

Nombre de plaques disponibles par nuit d'observation: 12.

Nature des plaques: G5 Ilford.

Nombre d'images par plaque: une cinquantaine en moyenne. On étudie actuellement un nouvel obturateur qui permettra de loger plus de 150 images par plaque, avec décalage automatique d'une image à l'autre.

*Domaine spectral.* Les premières plaques ont été prises en lumière globale. Nous utilisons alors un correcteur de dispersion pour éliminer la dispersion chromatique de l'atmosphère. Par la suite, nous avons utilisé un filtre jaune (GG14) centré aux environs de 5500 Å. Quelques plaques ont été prises en jaune et bleu. Le filtre bleu (BG 12 + GG 13) est centré sur 4200 Å environ.

*Distance focale.* Comme je l'ai indiqué, elle est de l'ordre de 30 mètres. Celle-ci est mesurée systématiquement par la méthode du collimateur.

Il est à remarquer que nous sommes placés au foyer cassegrain du télescope, et nous nous arrangeons pour que la position du plan focal  $P$  (Figure 3) soit à peu près toujours à la même distance de la base du grand miroir du télescope. Dans ces conditions, si on écrit:  $F$  distance focale globale;  $F_c$  distance focale du télescope seul;  $g_0$  grandissement linéaire au centre  $OT+OE$ ; nous avons la relation

$$F = g_0 F_c,$$

où  $F_c$  est à peu près constant.

L'expérience nous a montré que  $g_0$  pouvait varier d'une observation à l'autre. Le

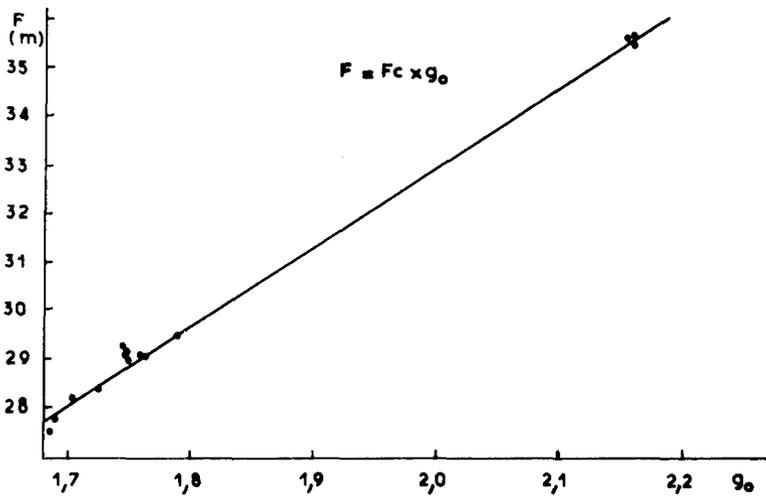


Fig. 11.

grandissement de l'optique de transfert restant, en principe, constant, on doit imputer ces variations à l'optique électronique (variation de position de la photocathode sur le haut de l'optique).

Nous avons porté les mesures de  $F$  obtenues en fonction de  $g_0$ . La linéarité est observée à 1% près. Ces petites variations de  $F_c$  sont très vraisemblables et peuvent s'expliquer par des modifications réelles de focale du grand miroir, d'une part; par le fait que nous ne travaillons pas exactement à même position de plan focal, d'autre part.

*Détermination de l'origine des angles de position.* Celle-ci est faite en imprimant sur chaque plaque deux petits points qui définissent une direction constante et connue par rapport au mouvement diurne. La précision de l'origine des angles de position est de  $0,1^\circ$ .

*Résolution instrumentale.* La résolution de l'optique électronique est mieux que  $40 dt/\text{mm}$ . Elle est plus grande que le pouvoir de résolution théorique de l'instrument utilisé, de 1 mètre de diamètre.

Le matériau observationnel est actuellement constitué par plus d'une centaine de plaques portant sur une cinquantaine d'étoiles différentes.

Je donne, dans le Tableau I, une liste de ces étoiles, en indiquant les distances approximatives, les magnitudes, et les temps de pose utilisés.

On constate que la majorité des étoiles photographiées jusqu'ici ont les caractéristiques suivantes: distance comprise entre  $1''$  et  $1''5$ ; magnitude du compagnon comprise entre 8 et 9; et  $\Delta m$  compris entre 0 et 1.

Un grand nombre d'étoiles visuelles est déjà accessible à cette méthode photographique. Le pourcentage d'étoiles plus serrées ( $<1''$ ) pourra être augmenté en améliorant la technique observationnelle. Il faut pouvoir 'stocker' le plus grand nombre d'informations dans le temps le plus court possible, afin d'accroître les chances d'enregistrement des images les mieux résolues. Un effort doit être fait dans ce sens. La réalisation de l'obturateur à grande cadence, déjà mentionné ultérieurement, est

TABLEAU I  
Matériau observationnel

Étoile (ADS)	Distance approchée	Magnitudes visuelles	Temps de posé ( $\times 0,02$ sec)	Étoile (ADS)	Distance approchée	Magnitudes visuelles	Temps de posé ( $\times 0,02$ sec)
1538	1,4	7,2-7,2	3	11722	1,5	8,0-8,4	30
1615	1,9	4,0-5,0	2	12160	0,6	7,0-7,5	5
3169	1,2	7,0-9,0	6	12201	2,3	7,4-8,9	34
3297	3,0	7,0-7,1	3	12269	1,5	8,9-9,2	30
4390	1,5	6,2-6,2	3	12414	2,3	8,2-8,8	34
5322	2,9	6,0-8,8	30	12808	0,5	6,0-7,2	1
5875	2,2	8,2-8,7	30	12962	1,4	6,0-6,8	2
6180	1,8	7,0-7,7	10	13082	2,0	7,2-8,6	20
6499	2,3	8,3-8,3	22	13165	1,3	8,8-9,0	34
6650 AB	1,1	5,0-5,7	2	13259	1,9	7,8-8,4	24
6663	2,4	7,7-9,8	34	13320	1,8	8,2-9,3	30
7236	1,7	7,7-8,2	20	13159	2,4	9,1-9,1	34
7352	1,9	7,5-7,6	10	13542	1,3	8,0-8,0	12
7695	2,3	8,2-8,2	20	14063	1,9	7,8-8,2	30
7704	1,3	7,0-7,2	8	14233	1,2	6,4-8,2	20
8043	0,9	7,5-7,6	8	14430	2,0	6,2-7,7	12
8575	1,3	7,5-7,8	17	14499	0,9	5,7-6,2	3
8667	1,5	9,1-9,1	34	14708	2,4	7,8-8,2	20
8804	0,4	6,0-6,0	1	14856	2,6	7,0-8,1	20
8914	2,0	7,3-7,8	15	14933	2,5	8,5-9,0	30
9168	2,2	6,8-9,0	28	15007	1,6	7,0-7,0	8
9343	1,1	3,5-3,9	1	15313	0,7	8,0-8,2	9
10890	0,9	6,6-6,9	5	15614	1,3	8,2-8,8	9
10905	2,6	7,0-7,0	5	15767	1,4	6,5-8,0	5
11483	1,7	6,8-7,2	15	15988	1,0	6,0-7,2	9
11640	2,3	6,2-6,6	8	16733	2,3	8,0-8,7	30

une première étape. Une autre étape pourrait être une modification de la caméra elle-même, pour mieux l'adapter à ce genre de problème.

Il est certain, en outre, que les possibilités de la caméra ne se limitent pas à ce genre d'étoiles. Je vais donner, à titre d'indication, des domaines très intéressants qui lui sont accessibles:

Grand  $\Delta m$ . On a pu prendre des images de l'étoile ADS 9347, de magnitudes 8,3–13,5 et de distance de l'ordre de 3"5.

Etoiles faibles. Sur une photographie du centre de l'amas M 15, on trouve des étoiles de magnitude d'environ 14, bien séparées jusqu'à 1" d'arc.

TABLEAU II  
Mesures de distance

Étoile	Époque	$P$ ("arc)
1538	1964,8	1,413
	1967,1	1,397
1615	1964,8	2,037
	1967,1	1,981
3297	1964,8	3,024
6650 AB	1964,8	1,076
	1967,2	1,021
	1969,3	1,009
7236	1967,2	1,694
7352	1967,2	1,975
7704	1966,0	1,269
8043	1969,3	1,285
	1967,2	1,277
	1969,3	1,223
8575	1966,1	1,350
	1967,2	1,389
8804	1969,3	0,439
8914	1966,1	2,003
	1967,2	2,010
	1969,3	1,970
9168	1966,1	2,190
	1967,2	2,184
9343	1965,5	1,082
10905	1966,5	2,580
11483	1966,5	1,758
	1968,6	1,735
11640	1966,5	2,419
	1968,6	2,434
12201	1966,5	2,269
	1968,6	2,315
12962	1966,5	1,378
12808	1965,5	0,471
13542	1965,5	1,316
15007	1966,5	1,654
	1968,6	1,664
15767	1968,6	1,432
16733	1965,5	2,261

### 7. Résultats concernant un certain nombre de mesures de distance

Nous donnons, dans le Tableau II, les résultats de distance obtenus jusqu'à présent. Le reste des mesures, d'angles de position et de différences de magnitude notamment, sera publié dès que le dépouillement des plaques obtenues sera terminé.

Nous avons représenté, dans les graphiques qui suivent (Figures de 12 à 18) les variations de distance en fonction du temps de quelques étoiles caractéristiques, mises en évidence par les mesures visuelles ou photographiques classiques.

Nous avons utilisé les notations suivantes: ● mesure visuelle micrométrique; ○ mesure visuelle par méthode de double image; □ mesure photographique classique; et + mesure photographique au moyen de la caméra électronique.

En outre, nous y avons porté les moyennes des mesures visuelles ou photographiques classiques. Ces moyennes ont été faites sans pondération particulière. Nous avons considéré que, dans l'ensemble, le nombre des mesures était suffisant pour que leur moyenne élimine les effets systématiques (équation personnelle en particulier). Ces moyennes sont notées par Δ.

Nous avons tracé la courbe passant au mieux par ces points moyennés, et considéré qu'elle représente la variation de distance réelle la plus probable.

### 8. Remarques particulières

ADS 1538. Cette étoile montre une variation très nette de distance. L'orbite, calculée

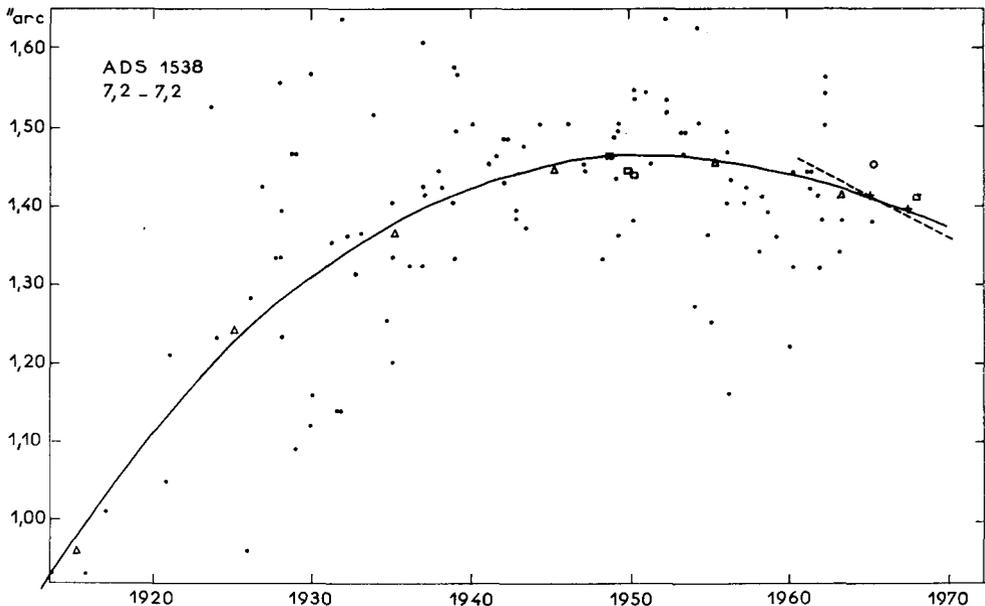


Fig. 12.

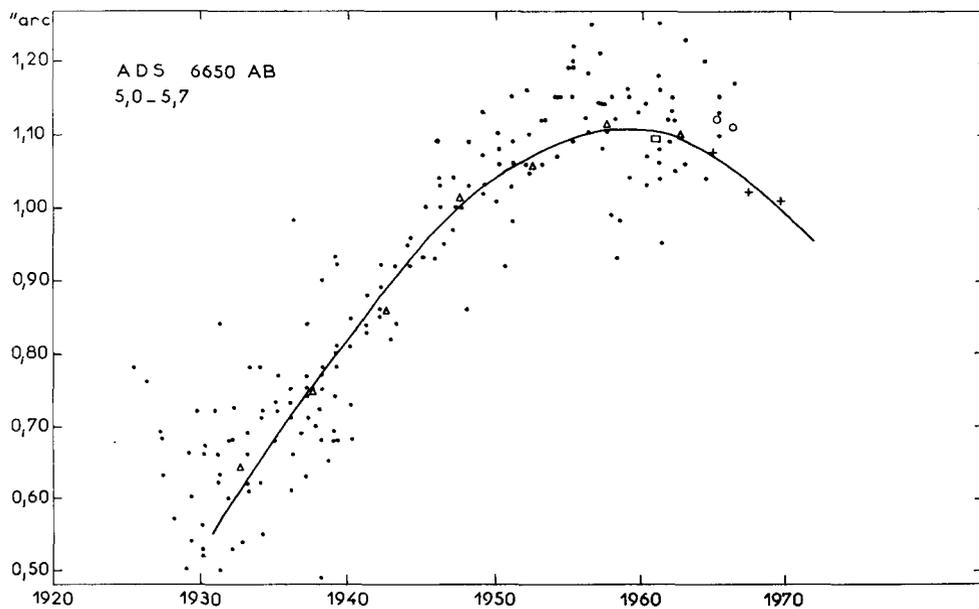


Fig. 13.

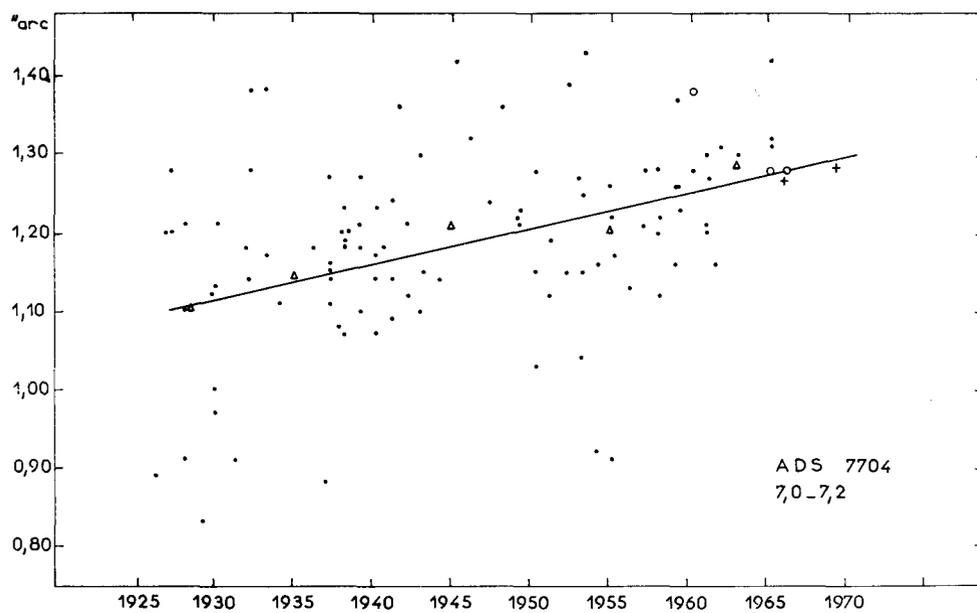


Fig. 14.

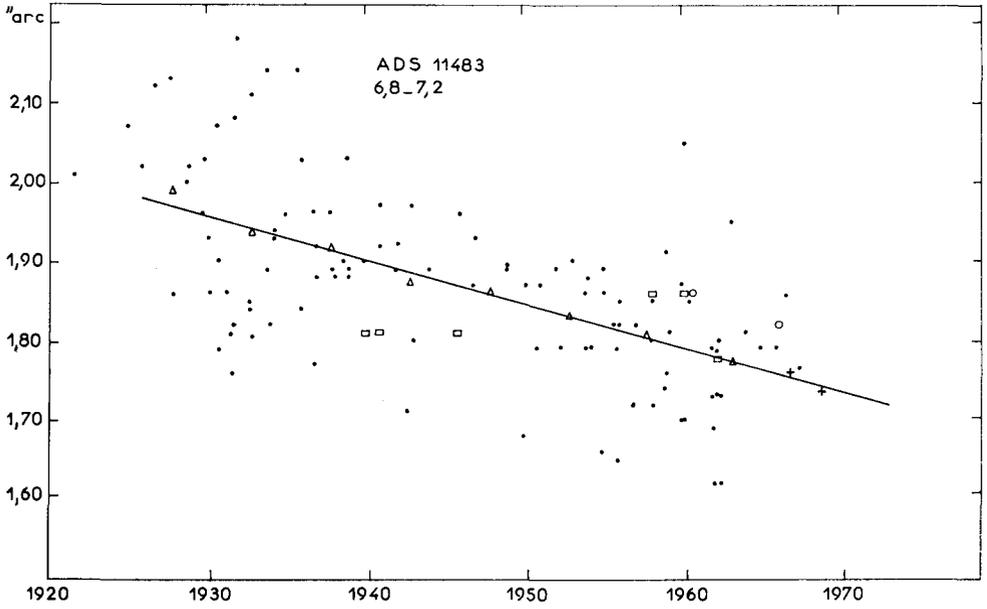


Fig. 15.

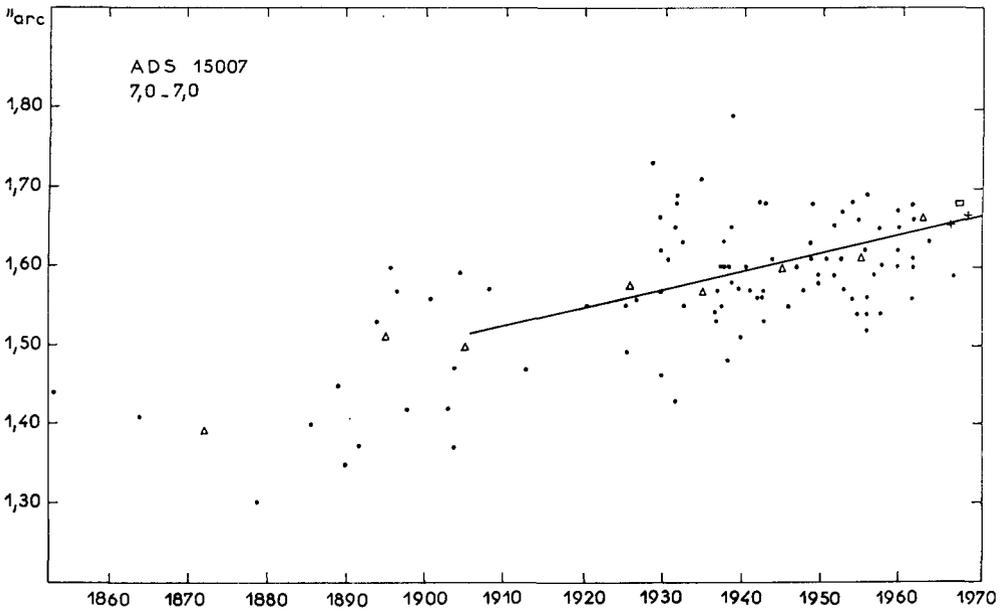


Fig. 16.

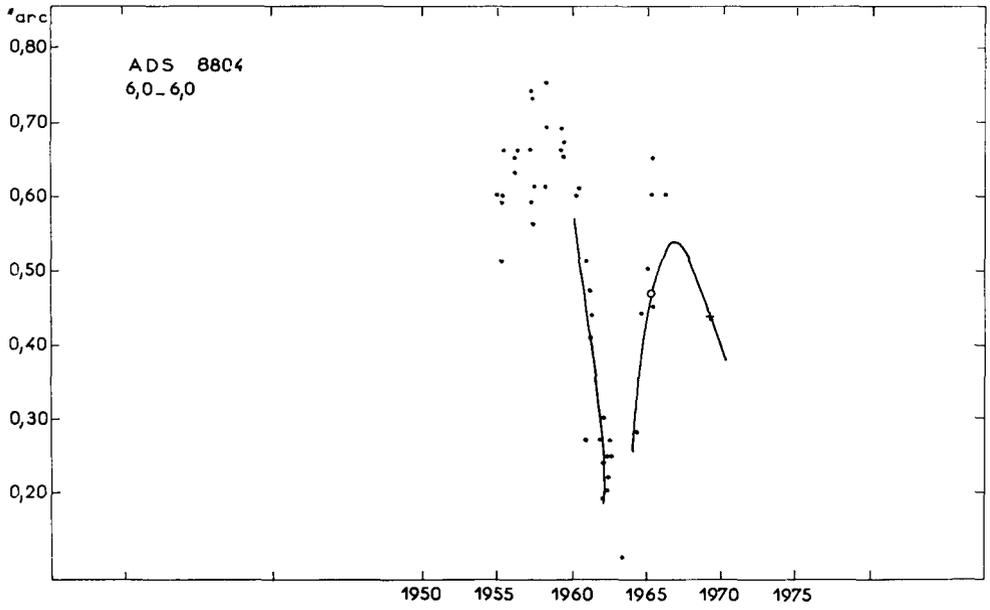


Fig. 17.

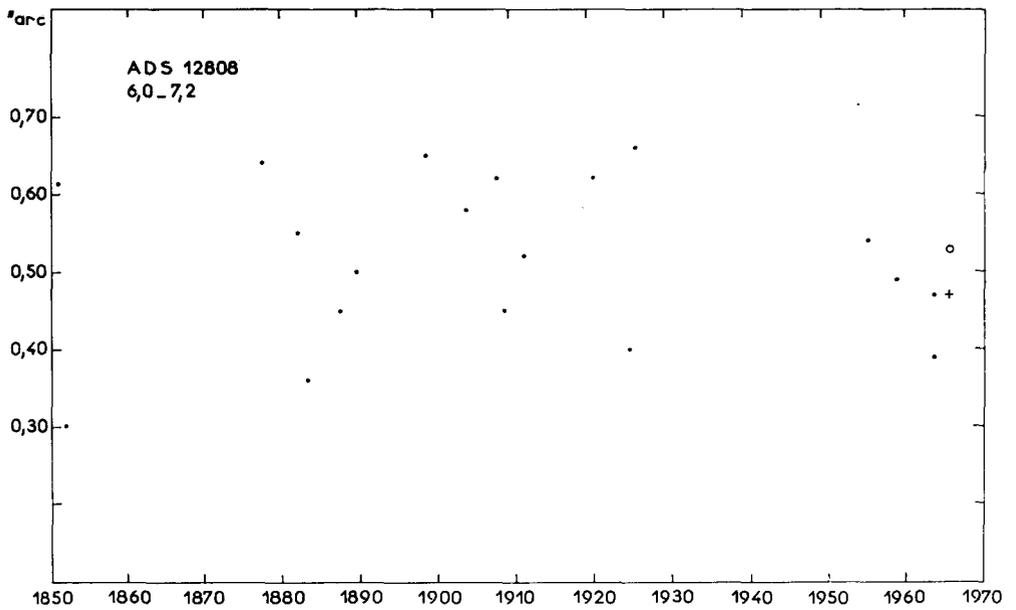


Fig. 18.

par CID en 1952, a été portée en pointillés; elle est très proche de la courbe observée dans l'intervalle de temps considéré.

ADS 6650 AB. L'orbite, calculée par Gasteyer en 1954, est nettement en dessus des mesures observées. Nous ne l'avons pas portée sur le graphique.

ADS 7704, 11483 et 15007. Ce sont des étoiles à grande période, pour lesquelles la variation de distance est pratiquement rectiligne dans l'espace de temps considéré. L'orbite de Zaera, calculée en 1957 pour ADS 7704, passe nettement plus haut que les mesures observées depuis 1960. Pour ADS 11483, l'orbite calculée par Heintz en 1954 passe légèrement plus bas que les mesures observées à partir de 1960.

ADS 8804. C'est une étoile de courte période ( $P=25,8$  ans). Le trait plein porté sur le graphique représente l'orbite calculée par Pavel en 1949. Notre mesure confirme parfaitement cette dernière.

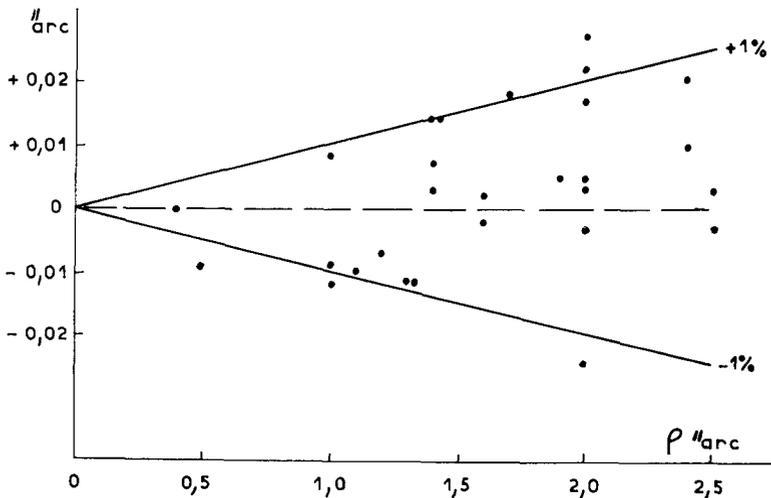


Fig. 19.

ADS 12808. Compte tenu du faible nombre de mesures effectuées pour cette étoile, nous n'avons pas cru nécessaire de tracer une trajectoire moyenne, d'autant que la distance a très peu varié. On peut simplement remarquer que notre mesure se situe très près du point moyen des mesures récentes.

Le graphique de la Figure 19 montre les résidus  $O-C$  de l'ensemble des mesures portées au Tableau II, en fonction des distances.

On peut remarquer que:

(1) Dans l'ensemble, les mesures effectuées au moyen de la caméra électronique se situent dans un domaine compris entre  $\pm 1\%$ .

(2) Si on mesure la moyenne des valeurs algébriques des résidus, on trouve

$$\frac{\sum_{n} (O - C)}{n} \simeq + 0,002'' .$$

Ce terme, qui représente l'erreur systématique globale, n'a pas une valeur significative. C'est ce qui nous permet de conclure, en particulier, que l'éventuel effet systématique introduit par le collimateur lors de la mesure de la distance focale, est faible et négligeable. Ce résultat devra être discuté à l'appui d'un plus grand nombre de mesures.

## 9. Conclusion

Il est bien connu que les étoiles doubles restent le seul moyen direct, actuellement à notre disposition, pour la détermination des masses stellaires. Mais la difficulté des mesures astrométriques, principalement dans la distance des composantes, fait qu'il est nécessaire d'utiliser un matériau observationnel très important et si possible obtenu par des observateurs différents, pour permettre de tirer une orbite avec une précision suffisante.

Nous avons montré qu'il était possible d'utiliser un convertisseur d'image pour faire ces mesures. Grâce au gain de temps de pose et par l'utilisation d'une méthode originale de mesure, on est ainsi capable de porter l'objectivité et la précision de la mesure photographique à un grand nombre d'étoiles, jusqu'à présent inaccessibles au procédé classique de photographie. Certes, les difficultés technologiques de cette méthode ne sont pas négligeables. On doit remarquer toutefois que ces difficultés diminueront de façon très appréciable avec le développement des convertisseurs d'image. Déjà, des caméras plus fiables sont aujourd'hui à l'étude (Combes et Follenbock, Kron, McGee). De plus, quelques modifications apportées à la caméra actuelle, pour une meilleure adaptation au problème des petits objets (étoiles doubles en particulier) se trouvent dans le sens favorable d'une simplification de la technologie. Enfin, on doit remarquer qu'un gain objectif sur la précision permet de diminuer de façon très appréciable le nombre de mesures nécessaires pour l'obtention d'une orbite. En les espaçant habilement, il est possible d'accéder à un programme quantitatif tout-à-fait valable.

Que peut-on espérer d'un gain de précision sur les mesures astrométriques des binaires visuelles?

En premier lieu, on peut en attendre une contribution appréciable aux calculs des orbites relatives. Ce qui peut se traduire, soit par un gain de précision sur leur tracé (augmentation de leur poids); soit, à précision égale, par un gain de temps sur leur détermination, ou, en d'autres termes, une augmentation de leur 'vitesse' d'obtention.

En second lieu, cela donne des chances nouvelles pour la mise en évidence de compagnons faibles des binaires visuelles par la méthode des perturbations, peut-être seul moyen à notre disposition pour approcher le problème si important des systèmes planétaires extra-solaires. [8].

## Remerciements

Mes remerciements vont tout particulièrement à M. Rösch, qui m'a donné l'idée de ce travail, les moyens matériels de le réaliser, et m'a aidé de ses conseils; à M. Wlerick et son équipe, qui m'ont permis d'installer une caméra électronique sur le télescope de

106 cm du Pic-du-Midi; à M. Lallemant, qui a bien voulu m'assurer le soutien indispensable de son laboratoire; à M. Couteau, qui m'a notamment fourni les mesures visuelles et photographiques utilisées au cours de cet exposé.

Je tiens à associer à ce travail MM. Despiau et Bücher, sans la collaboration desquels ces recherches n'auraient pu être réalisées.

### Bibliographie

- [1] Hertzsprung, E.: 1920, *Publ. Potsdam* 75.
- [2] Rösch, J.: 1958, *Photo-Electronic Image Devices*, Academic Press, p. 113.
- [3] Strand, K. Aa.: 1937, *Ann. Van De Sterrewacht te Leiden*, Deel XVIII, Tweede Stuk.
- [4] Rösch, J., Wlerick, G., et Boussuge, G.: 1961, *Photo-Electronic Image Devices*, Academic Press, p. 357.
- [5] Laques, P.: 1965, *Advances in Electronics and Electro-Physics*, Vol. 22, Academic Press, p. 755.
- [6] Boussuge, G., Wlerick, G., Courtois, N., et Rösch, J.: 1964, *Ann. Astrophys.* 27, 104.
- [7] Duchesne, M., Feissel, M., et Guinot, B.: 1965, *Publ. Obs. Paris* XXVI.
- [8] Dommanget, J.: 1969, *Ciel et Terre* 85, 75.

### Discussion

*Rakos:* What is the total time required for one observation of a double star, preparation and reduction included?

*Laques:* Cela dépend du temps de pose. Le temps de pose est d'ordre de 1/20 seconde pour une étoile de magnitude 7. Je ne pense pas que le temps de préparation de la caméra doive être pris en considération. L'équipe 'de jour' s'en charge. Elle dure une journée. Une fois la caméra prête, c'est un appareil photographique ordinaire. En fait, seul le temps de pose intervient. On prend une cinquantaine de poses par plaque; il faut environ 4 minutes. Pour la réduction par la méthode micrométrique, il faut compter ½ journée. Pour la méthode des courbes d'isodensité, il faut 2 à 3 jours par plaque. Actuellement, nous sommes limités par le nombre de plaques. En une nuit, on ne dispose que de 12 plaques. En raison des plaques d'astrométrie qui sont destinées à la mesure de la distorsion et de la distance focale, il reste 10 plaques disponibles par nuit.

*Rösch:* Ce n'est pas par défaut de moyens de dépouillement que le rendement actuel est faible dans le temps. De toutes façons, la précision est là, et c'est elle qui importe.

*Laques:* Par rapport à la photographie classique, le gain est en particulier en temps de pose, qui doit se traduire aussi par un gain en cadence de prise de vue, c'est-à-dire en fin de compte en quantité d'information utilisable enregistrée par unité de temps; et c'est cela qui me paraît important.

*Morel:* Je voudrais demander à Monsieur Laques s'il avait fait une étude des erreurs systématiques pouvant affecter la mesure de la distance (effets analogues à l'effet Eberhardt pour la photographie).

*Laques:* Le tableau montré indique les *O-C*.

*Morel:* Ce sont des erreurs aléatoires et non systématiques.

*Laques:* Savoir s'il y a des résidus de distorsion, par exemple. Je n'ai pas fait cette étude car je ne dispose pas encore d'un matériel suffisant.

*Deutsch:* Mesurez-vous l'angle de position?

*Laques:* Oui, on mesure l'angle de position. Je n'ai donné des résultats que sur les distances parce que je me suis attaché à les mesurer en priorité, car je pensais qu'il fallait porter son effort surtout sur les mesures de distance. J'en ai indiqué la méthode. Sur le cliché présenté au début, nous avons vu, sur les bords du champ circulaire, deux petits points qui définissent une direction bien connue par rapport au mouvement diurne. Nous pouvons donc mesurer l'angle que fait le couple avec la direction du mouvement diurne d'où nous tirons l'angle de position.

*Proust:* Vous avez donné des *O-C* pour la distance. En disposez-vous pour l'angle de position?

*Laques:* Pour l'angle de position, nous n'avons pas actuellement assez de mesures. Je pense que le gain en angle de position sera inférieur à celui en distance. Cela ne me paraît pas très grave, parce qu'il est bien connu que la précision des mesures visuelles est meilleure sur l'angle de position que sur la distance. C'est donc surtout la précision en distance qu'il faut améliorer.