UNIVERSITE DE LILLE - FACULTE DES SCIENCES

Mémoire pour l'obtention du

DIPLOME D'ETUDES SUPERIEURES

#### XXXXXXXXXXXX

Projet de Télescope Zénithal Photoélectrique

# XXXXXXXXXXXX

présenté à Lille le 15 octobre 1966 devant le jury :

MM. BACCHUS Président,

SCHILTZ

BECART Examinateurs,

SECTION DE SCIENCES

par François CARREEL

Ce travail a été réalisé à l'Observatoire de Lille sous la conduite bienveillante de Monsieur le Professeur BACCHUS. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour les conseils et les suggestions qu'il m'a toujours donnés.

Je remercie tous ceux qui m'ont apporté leur aide, pour les soirées d'observations, pour la programmation et le calcul en machine, pour la réalisation technique, pour la rédaction du présent mémoire.

# SOMMAIRE

Chapitre I : LE TZP

Chapitre II : LE PROJET DE TELESCOPE ZENITHAL PHOTOELECTRIQUE.

I : Position du réticule II : Forme du réticule

III : Méthode d'Erik Høg : cercle méridien photoélectrique.

#### Chapitre III : DESCRIPTION.

I : Le réticule

II : Retournement précis de l'objectif

III : Le système "trou-trait-plan"

IV : Le bain de mercure

V : L'oculaire VI : L'objectif VII : Le bâti.

#### Chapitre IV : ALIGNEMENT DES DIVERS ORGANES. MISE AU POINT.

I : Bain
II : Prisme
III : Réticule

IV : Mise au point.

# Chapitre V : REDUCTION.

I : Calcul des "c"

II : Détermination des "c" et des "o-c".

III : Résultats et interprétation des courbes

IV : Révision des approximations sur la forme de la trajectoire

et sur la vitesse angulaire des étoiles.

V : Réduction au jour.

VI : Méthode des moindres carrés; évaluation de la dispersion.

# Chapitre VI : QUELQUES IDEES SUR LA METHODE PHOTOELECTRIQUE.

I : Les possibilités de la cellule

II : Le bruit de fond

III : Quelques résultats expérimentaux

IV : Conclusion

#### BIBLIOGRAPHIE.

#### Chapitre I

#### LE T.Z.P.

Le télescope zénithal est un instrument astronomique spécialement conçu pour la mesure très précise des <u>distances</u> <u>zénithales méridiennes</u> d'étoiles voisines du zénith.

C'est surtout par un procédé d'observation photographique que des résultats d'une grande précision ont pu être obtenus.

Outre la mesure de la distance zénithale, le TZP permet la mesure de <u>l'instant</u> de passage d'une étoile au méridien. C'est donc aussi un appareil qui mesure <u>le temps</u> (1).

Voici une description sommaire du TZP: un objectif astronomique est fixé, axe optique vertical, au-dessus d'un bain de mercure, de manière que le plan focal image soit tout près de l'objectif, au-dessous (fig. 1).

Une plaque photographique, fixée au barillet, est positionnée au foyer, côté sensible au-dessous.

Supposons que la plaque reste fixe pendant le passage d'une étoile dans le champ : l'image focale se déplace dans le mouvement diurne et décrit une trajectoire approximativement rectiligne, qui impressionne la plaque sensible.

En fait, la plupart des étoiles ont un éclat trop faible pour marquer leur trajectoire sur la plaque; un moteur synchrome translate celle-ci parallèlement au déplacement de l'image qui reste dors fixe par rapport à la plaque.

Afin de définir quand même la trajectoire, on réalise cette opération en deux endroits distincts de la photographie, grâce à une translation bien définie, effectuée obturateur fermé.

On recommence le tout après avoir retourné l'ensemble objectif et plaque de 180° exactement autour d'un axe vertical,

c'est-à-dire passant par le zénith dont l'image reste fixe sur la plaque. Cette opération est fondamentale pour localiser le zénith sur la plaque, et elle est nécessaire pour chaque étoile, compte tenu de l'instabilité de la liaison plaque-objectif.

Il est clair que la distance entre les deux trajectoires, définies par 4 images ponctuelles, représente le double de la distance zénithale. La direction du mouvement diurne étant définie sur la photographie par deux images relatives à une même position de l'objectif, si le milieu de chaque pose est repéré par un enregistrement de temps, il est possible de calculer, à partir de la position des 4 images, l'instant de passage au méridien.

La figure 2 est une plaque qui présente les 4 images d'une même étoile prises au oours d'un passage.

En réalité le <u>retournement</u> est <u>effectué</u> entre chacune des 4 poses ce qui explique que les images sont assez distantes sur une trajectoire donnée.

Remarquons que l'ensemble des 4 points formerait un rectangle si les expositions étaient synétriques par rapport à l'instant de passage au méridien.

La verticale astronomique est définie on ne peut plus rigoureusement par le bain de mercure. Notons qu'une légère inclinaison de l'objectif n'empêche alors pas un rayon vertical de se réfléchir sur lui-même, remarque mise à profit ainsi qu'il est montré au chapitre suivant.

#### Chapitre II

# Le PROJET de TELESCOPE ZENITHAL PHOTOELECTRIQUE. (2)

Certes, le TZP est un instrument de précision, mais il faut s'empresser d'ajouter que chaque télescope zénithal photographique est un chef-d'oeuvre de mécanique.

Les résultats dépendent :

- de la réalisation extrêmement délicate, donc coûteuse, qui doit assurer un chariotage uniforme et rectiligne de la plaque dans la direction du mouvement diurne, ainsi qu'un retournement précis à 180° qui a lieu 3 fois <u>au cours</u> d'un passage.
- du soin que l'opérateur apportera <u>après</u> l'instant de service du TZP, aux mesures à effectuer sur la photographie, mais surtout d'abord au développement avec toutes les précautions qu'il exige pour diminuer les risques de distorsion de l'émulsion.

Le projet de télescope zénithal photoélectrique tire son originalité de deux points fondamentaux :

- il est d'une simplicité mécanique remarquable : la plaque mobile est remplacée par un réticule <u>fixe</u> tracé <u>sur</u> l'objectif lui-même. Il y a fixité absolue de tous les organes pendant un passage d'étoile. Le retournement reste indispensable pour déterminer les constantes instrumentales (voir Chap. III § I ), mais il n'a plus le <u>caractère fondamental</u> lié à chaque mesure. Sa technique est précisée au chapitre suivant sour le titre "Retournement de l'objectif".
- les résultats immédiats des mesures sont uniquement des instants de passage. Ils échappent aux risques précédemment cités, et postérieurs à l'instant des mesures. Ils peuvent être enregistrés directement sur cartes ou rubans perforés en vue de la réduction sur une calculatrice.

Le paragraphe 2 conduit par étapes successives à justifier le choix de la géométrie du réticule, le paragraphe 1 justifie sa position. Le pagraphe 4 rappelle brièvement la méthode photoélectrique appliquée par Erik Høg sur le cercle méridien et qui a en partie suggéré ce projet.

#### I - Position du réticule.

Le réticule tracé sur l'objectif lui-même est une solution idéale au problème de la rigidité entre ces deux organes. Hais ce résultat est bien inutile dès lors que l'image du zénith sur le réticule n'est pas définiede manière fidèle.

Considérons en effet un rayon lumineux vertical passant par le point nodal objet N. Il sort encore vertical en passant par le point nodal image N', revient sur lui-mêne après réflexion sur le bain de mercure, et coupe le plan du réticule R en Z, image focale du zénith (fig.3)

Soit  $\alpha$  un défaut d'horizontalité du plateau porte objectif, c'est aussi l'angle entre la verticale et l'axe de rotation de l'objectif. Soit d la distance de N' à la surface inférieure de la lentille.

Z est distant de l'axe de rotation de  $\alpha d_i$ et il est clair qu'après retournement de 180°, le nouveau point Z se trouve à une distance 2 $\alpha$ d de la position précédente. Voir calcul numérique au chapitre III, "position du réticule".

Si l'objectif est tel que N' coïncide avec la face qui porte le réticule, d=o et  $\alpha d=o$  quel que soit  $\alpha_\bullet$ 

L'horizontalité de l'objectif n'est alors plus fondamentale et ceci élimine une importante source d'erreur.

Il importera donc que l'objectif soit construit de telle sorte que l'un des points nodaux coïncide avec une des 4 faces. Ses paramètres seront calculés pour qu'il en soit ainsi.

# II - Forme du réticule

 $A_p$ rès réflexion sur le bain de mercure, la lumière converge dans le plan du réticule et après une 2ème traversée de l'objectif est réfléchie latéralement par un prisme à réflexion totale.

Une lentile sépar encore le faisceau de la cellule photoélectrique de sorte que le cercle oculaire se forme sur la cathode (fig. 4).

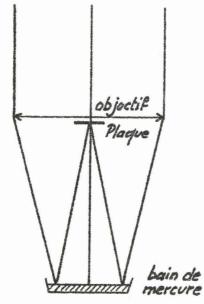


Fig. 1 - Schema de principe du TZP

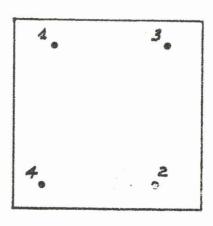
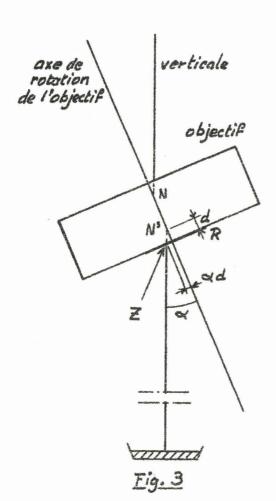
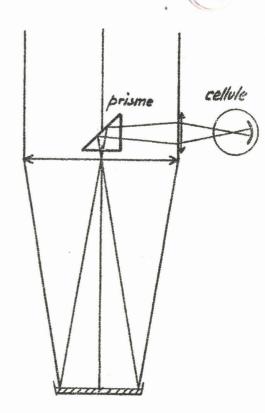
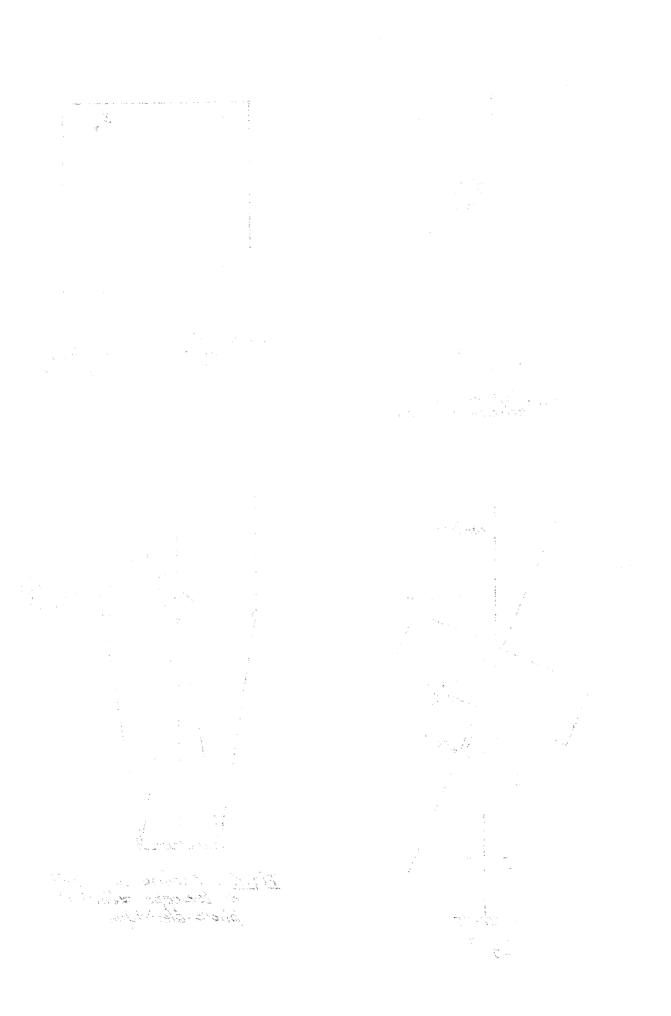


Fig. 2 - Plaque présentant les 4 images d'une mêma étoile, numérotées chronologiquement de 4 à 4





<u>Fig. 4</u> \_ Schéma de principe du télescope zénithal photo-électrique.



La cellule photomultiplicatrice analyse le flux lumineux en fonction du temps.

Supposons que le réticule soit constitué par un seul trait opaque orienté exactement suivant le méridien et passant par l'image du zénith (fig. 5). L'instant t de passage au méridien coîncide avec celui du passage de l'image stellaire sur le trait; à cet instant le flux lumineux est interrompu et le courant photo-électrique correspondant s'annule, ainsi qu'on peut l'observer à l'oscilloscope; l'instant to est mesurable avec une certaine précision.

Si le trait unique est remplacé par 2 traits perpendiculaires orientés dans les azimuts +45° et -45° et se coupant au zénith, le courant photoélectrique présente alors deux interruptions aux instants t<sub>e</sub> et t<sub>2</sub>.

La demi-somme est l'instant de passage au méridien; la demi-différence n'est pas autre chose que la distance zénithale divisée par  $\cos\delta$  (du moins en négligeant la courbure dans une première approximation). A ce stade, l'instrument fournit donc les deux informations distance zénithale et instant de passage, ou bien ce qui est équivalent, les coordonnées  $\delta$  et  $\alpha$  de l'étoile si on connaît les coordonnées  $\xi$  et L du lieu d'observation (où réciproquement L et  $\varphi$  connaissant  $\alpha$  et  $\delta$ ).

Comme l'exploitation d'un grand nombre de mesures permet de réduire la dispersion des résultats, chaque trait est remplacé par un grand nombre de traits parallèles, et c'est finalement sur une grille que l'image stellaire se déplace (fig. 6).

Il résulte un flux lumineux périodique, selon que l'image passe sur untrait ou entre deux traits; le courant photo-électrique i est lui aussi périodique, il convient de déterminer sa phase avec précision.

Le diagramme de la figure 7 représente le courant photoélectrique idéal en fonction du temps, c'est-à-dire qu'on néglige le bruit de fond et le courant d'obscurité; on néglige aussi le diamètre stellaire dont l'image est supposée sans diffraction ni ni aberration, sans scintillation, ni agitation.

Les traits sont supposés aussilarges que les intervalles compris entre 2 traits.

Avec une étoile de faible éclat, ces "créneaux" risquent de diminuer en amplitude au point de n'être plus discernables dans les fluctuations des courants parasites qui ne manqueront pas d'apparaître avec l'amplification notable que nous serons amenés à utiliser (bruit de fond).

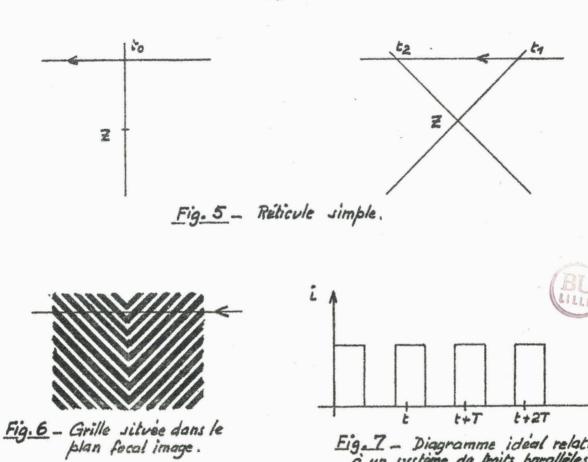
La courbe réelle aura donc plutôt l'allure de la figure 8.

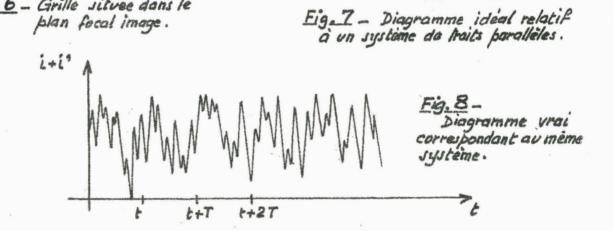
Les variations périodiques de courant dues au passage de l'image stellaire sur la grille ne sont pas visibles à l'oscilloscope. Elles ne sont plus exploitables directement; cependant, il reste vrai que ces variations se répètent régulièrement et à un intervalle T bien connu qui dépend de la construction de la grille.

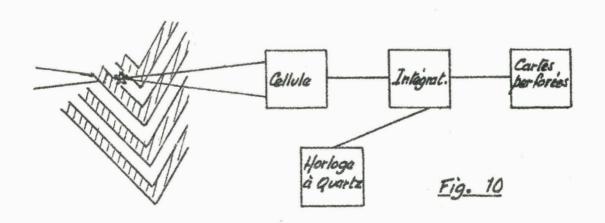
On peut considérer que le diagramme de la figure 8 est la superposition du précédent i(t) et d'un courant parasite i'(t) dont l'amplitude en fonction du temps n'a rien de périodique.

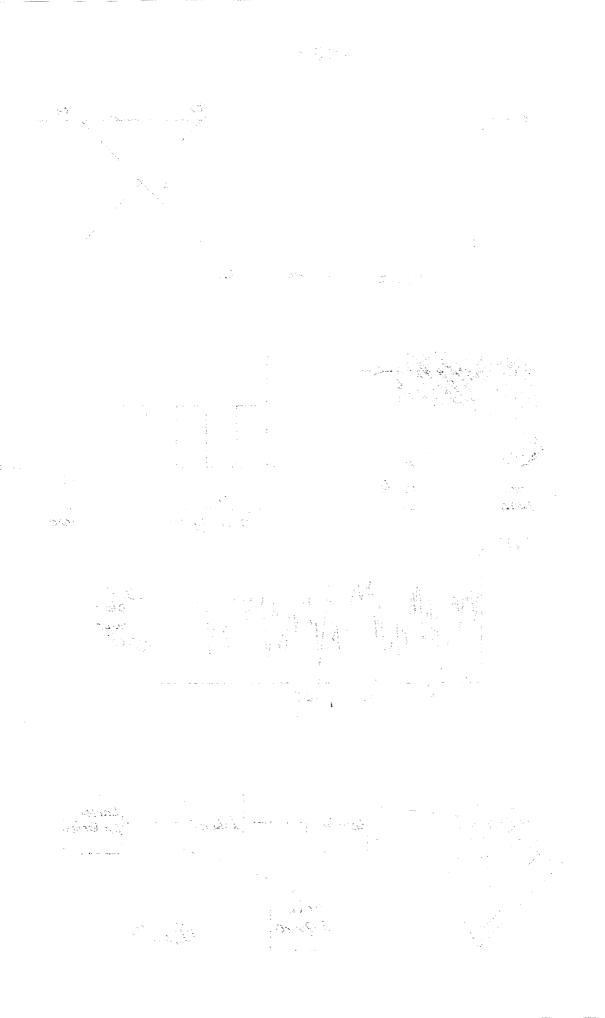
Si on découpe la courbe vraie (fig. 8) en N intervalles de longueur T et que l'on superpose ces portions de courbe ainsi obtenues, le bruit de fond qui n'obéit à aucune loi périodique croît au plus comme  $\sqrt{N}$ , tandis que i(t) qui a une allure bien déterminée en fonction du temps croît comme N : le rapport signal/bruit est amélioré.

L'intégration de i+i' = f(t) peut être schématisée ainsi : chacun des N intervalles de largeur T est découpé en n tranches égales de numéros 1,2,3, ....i,...n. L'intégration consiste à faire n sommes de N termes (un terme dans chaque intervalle), conduisant à n résultats qui doivent permettre la reconstitution d'une période complète). Ces résultats sont perforables sur cartes en même temps que les instants correspondants (modulo T). La figure 10 résume l'ensemble des opérations.









# III - Comparaison avec la méthode de Erik Høg : cercle méridien photoélectrique.

Le procédé que nous venons de décrire est la transposition de celui de Høg (3) que nous rappelons brièvement:

Pendant le passage d'une étoile dans le champ de la lunette méridienne, l'image focale se forme alternativement sur les traits opaques d'une grille fixe ou entre deux traits. La lumière qui traverse la grille tombe sur un photomultiplicateur connecté à un compteur d'électrons. Les indications de ce compteur sont enregistrées sur cartes perforées avec les instants précis correspondants. Il y a 10 comptages par seconde. L'instant de passage est déduit des cartespar un calculateur.

Hég prévoit une grille avec 2 systèmes de traits parallèles de manière à calculer non seulement l'ascension droite mais aussi la déclinaison.

#### Comparaison:

Høg n'exploite pas le fait que i(t) est périodique, mais de période bien connue fonction des caractéristiques de la grille et de la déclinaison de l'étoile. Il est vrai que la lunette méridienne peut-être pointée sur des étoiles de  $\delta$  très diverses dont la vitesse angulaire varie par conséquent dans une large mesure.

Dans le TZP, la vitesse angulaire, varie peu; il s'ensuit que le courant photoélectrique est limité à une bande de fréquences très étroite.

Nous utiliserons pour l'intégration un procédé qui s'apparente à la détection synchrone, non pas pour mesurer une amplitude, mais une phase à une petite fraction de période près.

Pour le comptage, Høg garde toute l'information : il a donc beaucoup de nombres à traiter <u>après</u> l'observation. De plus le comptage est une opération délicate qui demande un appareillage compliqué.

Par intégration, nous devons parvenir à garder presque

toute l'information avec moins d'appareillage et de nombres à perforer. Nous sortons le résultat sous forme d'une période bien repérée dans le temps.

#### Chapitre III

Le véritable but est la réalisation d'un télescope zénithal photoélectrique tel qu'il vient d'être sommairement décrit, pour ce qui concerne ses caractéristiques fondamentales.

Avant de rettre en oeuvre ce gros travail, il était indispensable de l'entreprendre, à une petite échelle, provisoirement,
afin de découvrir les principaux problèmes auxquels nous devrons
nous heurter et afin d'y remédier dans toute la mesure du possible
dans la conception même de l'instrument définitif. Un premier montage a été réalisé en vue de l'observation visuelle, sur un réticule
lié à l'objectif (ce qui constitue déjà un mode d'observation zénithale original).

#### DESCRIPTION

Dans ce chapitre, chaque paragraphe est consacré à la description d'un principe de construction ou d'un des éléments qui constituent le télescope construit à l'observatoire. Le premier paragraphe décrit le réticule choisi et justifie son choix. Les paragraphes 2 et 3 exposent deux systèmes mécaniques à la fois simples et efficaces qui jouent un rôle essentiel dans le réglage et le fonctionnement de l'instrument.

#### I - Le réticule.

# 1) Géométrie du réticule.

Il n'est pas tracé sur l'objectif (qui ne sert qu'occasionnellement pour le télescope zénithal et appartient en fait à une autre lunette). Il est réalisé en fil d'araignée porté par une bague collée sur l'objectif. La grille est réduite à deux séries de deux fils parallèles, soit à quatre fils qui définissent un carré au mieux qu'il est possible de le faire.

Afin de justifier ce choix, reprenons l'explication de la page concernant un réticule formé de deux traits perpendiculaires dont la bissectrice est contenue dans le plan méridien.

Dans la réalité, les traits ou les fils n'ont jamais une position aussi idéale, quel que soit le soin apporté à leur réalisation puis à l'orientation de l'objectif.

L'écart entre la position vraie et la position idéale d'un fil est entièrement caractérisé par 2 paramètres :

- translation dans une direction parallèle au mouvement diurne (défaut de centrage)
- rotation du fil translaté qui l'amène dans un azimut différent de 45° (défaut d'orientation) (fig. 11).

Il importe de connaître en grandeur les deux paramètres qui sont des constantes instrumentales.

- -la translation est déterminée par comparaison des temps de passage mesurés pour un certain nombre d'étoiles avec une position de l'objectif et des temps mesurés pour un autre ensemble d'étoiles dans la seconde position del'objectif.
- le défaut d'orientation est décelé par la présence de deux fils parallèles au lieu d'un seul, dont la distance a été mesurée au microscope (figure 12).

On compare pour cela le temps mis par l'image stellaire pour passer d'un trait à l'autre avec le temps qu'elle aurait dû mettre, compte tenu de sa vitesse avec une orientation idéale.

On peut

aussi déterminer l'orientation à l'aide des graphiques dont la théorie est précisée et appliquée au chapitre des observations.

De nombreuses difficultés ont accompagné la fabrication d'un réticule qui soit bien défini.

Il importe en effet qu'aucun. des fils n'entre en contact

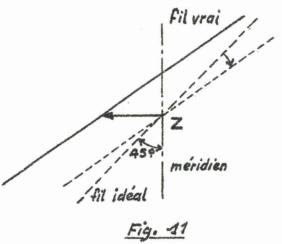


Fig. 12



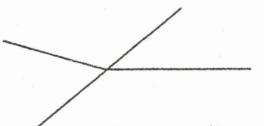
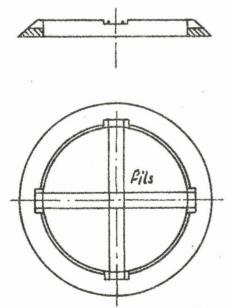
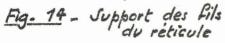




Fig. 13 - Défaut d'un réticule





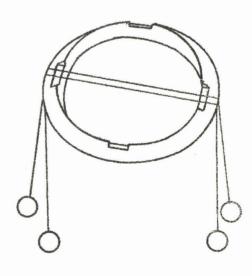


Fig. 15 - Positionnement et fixation des fils



avec un autre de la série perpendiculaire, ce qui rendrait fort douteux leur caractère rectiligne; et il faut cependant que tous les fils soient pratiquement dans le plan focal.

Beaucoup de temps fut passé à la confection d'un certain nombre de réticules jamais satisfaisants : ou bien un fil mal tendu n'était pas rectiligne, ou bien l'observation au microscope montrait un point anguleux au point de rencontre d'un fil perpendiculaire. Dans ce dernier cas, il suffisait de souffler un peu de buée sur l'ensemble pour détendre le fil et constater que le contact un instant plus tard se faisait à un endroit différent (fig. 13).

Finalement, voici la marche suivie, conduisant à un résultat satisfaisant :

Dans une rondelle de laiton dont la section est représentée à la figure 14, on creuse à la lime quatre petits "créneaux" dont le fond est plan. Deux créneaux opposés définissent un plan perpendiculaire à l'axe de la rondelle et sur lequel sera posé un couple de fils. Les deux plans ainsi définis sont distants de 0.1 millimètre.

Tout contact entre les fils est ainsi évité, et la mise au point sur les 4 fils simultanément reste possible avec la profondeur de champ d'un objectif usuel.

Pour fixer les fils, distants de 2mm environ, pour un couple, chacun d'eux est relié à ses deux extrémités à une petite boule de cire ou de paraffine; puis il est posé sur son plan sur un trait de repère. Ces traits sont préalablement marqués par pression légère d'un tire-ligne pour assurer un parallélisme convenable.

Les premiers fils placés sont ceux qui doivent être fixés sur le plan inférieur (fig. 15). On laisse alors tomber dans chaque créneau une goutte d'archanson.

Il faut faire fondre à nouveau cette colle qui s'est solidifiée trop instantanément pour adhérer réellement, en appuyant
par exemple la pointe d'un fer à souder chaud contre la partie
inférieure de la bague. On profite, à ce stade, pour envoyer par
le souffle un peu de vapeur d'eau pour allonger les fils qui seront
alors bien tendus une fois secs. Il n'y a plus qu'à couper les fils
pour libérer les masselottes.

# 2) Position du réticule par rapport à l'objectif.

Le réticule est posé au centre de l'objectif, puis collé (voir chapitre "Alignement des éléments").

Les fils sont donc au-dessus et très près de la surface de l'objectif tandis que le point nodal image se trouve au-dessous et à 2mm environ.

Une telle discordance serait intolérable dans un montage définitif. Pour le montage d'essai actuel, elle se révèle de peu d'importance.

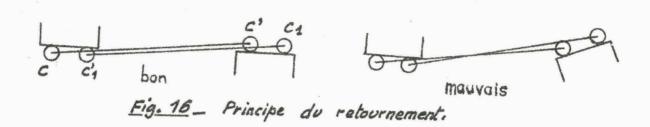
Calculons en effet le déplacement maximal de l'image focale du zénith (chapitre I - § 1). L'axe effectif de retournement est déterminé au moyen d'un niveau sensible au 1/20e de tour des vis calantes du plateau porte-objectif. Le pas étant égal à 1mm, c'est à 50 microns près sur une portée de 11 cm que se trouve réglée l'horizontalité de l'objectif. Son inclinaison maximale est donc égale à  $50/11.10^4 = 4,55.10^{-4}$ rd, soit environ 1,5.

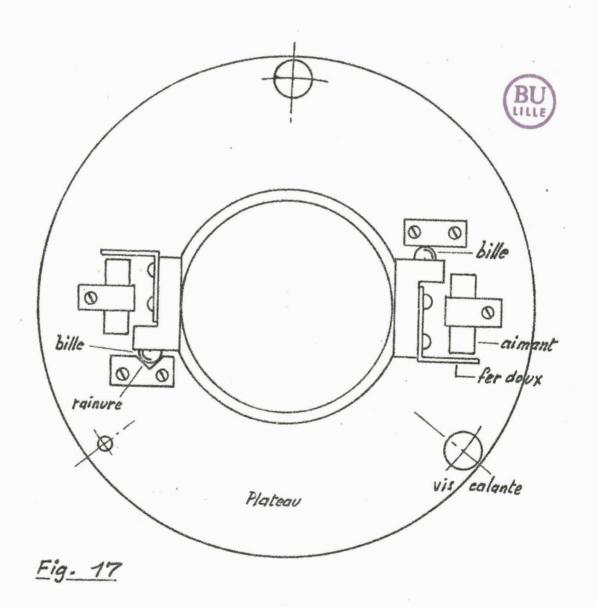
Avec d = 
$$2 \text{mm}$$
 et  $\alpha = 4,55.10^{-4} \text{rd}$   
d $\alpha = 2.10^{-3}$  x 4,55.10<sup>-4</sup> = 0,91 micron.

Les étoiles observées ont une déclinaison voisine de la latitude du lieu d'observation, soit 50°40'.

Leur vitesse angulaire sur la sphère céleste est donc  $2\pi \cdot \cos 50^{\circ}40' = 2\pi \times 0,634 = 4 \text{ rd/j.sidéral, soit encore}$   $\frac{4}{86 \cdot 164} = 4,6.10^{-5} \text{rd/s}$ , qui correspond dans le plan des fils à une vitesse linéaire égale à :  $4,6.10^{-5} \cdot \text{F} = 4,6.10^{-5} \cdot 149 = 68,5 \text{ micron/s.}$  0,91 micron est la distance parcourue par l'image en  $\frac{0.91}{68,5} = 1,32.10^{-2} \text{ seconde.}$ 

L'erreur est acceptable dans l'observation visuelle, mais sera loin d'être négligeable lorsqu'on voudra avec le télescope zénithal définitif atteindre une précision de l'ordre de 0,001<sup>S</sup>. La distance réticule point nodal devra être réduite à moins de 0,2mm, précision avec laquelle le point nodal est lui-même défini. La mise à niveau sera par ailleurs nettement améliorée par des vis plus précises.







#### II - Retournement précis de l'objectif

Lobjectif est un achromat de 90mm d'ouverture. La description précise de ses caractéristiques est donnée au paragraphe "L'objectif". Le barillet est vissé sur une bague cylindrique dont la face inférieure, plane, repose sur un plateau à face supérieure plane (voir "Plateau porte-objectif").

Un tel dispositif fixe 3 paramètres de liberté de la lentille qui peut encore tourner autour d'un axe perpendiculaire à son plan de repos ou translater de manière quelconque sur ce plan.

Il convient de fixer les autres paramètres, essentiellement la rotation, avec la condition de pouvoir effectuer lorsqu'on le désire le retournement de 180°, rapide et précis.

Deux billes sont solidaires de l'objectif. La droite cc' joignant leurs centres est donc fixe par rapport à l'objectif (fig. 16).

Si l'un des plans de référence est remplacé par une rainure verticale, il n'y a plus de parallélisme à assurer, et si les billes sont fixées à la même hauteur par rapport au plateau, c'est le même point de chaque cale qui est en contact avec l'une ou l'autre bille. A ce stade, c et c' sont permutés, sûrement, même en l'absence d'une haute précision sur la fabrication des cales. Il importe alors que les billes aient même diamètre, ce qui est assuré avec un haut degré de précision.

Les billes sont diamétralement opposées au mieux qu'il est possible de le faire. Mais cette condition n'est absolument pas requise pour réaliser un retournement exact.

Chaque bille d'acier est sertie sur une pièce rigidement liée à l'objectif.

Un "verrouillage" assure l'immobilité de l'objectif, une fois mis en place, constitué par deux aimants droits fixés sur le plateau, en présence de fer doux sur le barillet.

Il importe de s'assurer que les billes portent bien sur les faces de référence de la rainure et non sur les arêtes et que le dispositif de verrouillage n'ait aucun contact avec l'objectif (fig.17).

#### III - Le système "trou-trait-plan".

Il s'agit là encore d'immbiliser un élément instantanément et dans une position précise avec la possibilité de régler à niveau. C'est le cas du plateau porte-objectif ou du bain de mercure.

Son équilibre étant parfaitement défini par 3 points fixes la pièce repose par 3 vis calantes  $v_1, v_2, v_3$ , sur les cales  $c_1, c_2$   $c_3$ .

Pour que le contact soit défini sans ambiguité, la cale relative à V<sub>1</sub> comporte un trou conique (en toute rigueur, il devrait avoir la forme d'un trièdre) dont la pente est inférieure à celle de l'extrémité conique et arrondie de la vis (fig. 18).

 $V_2$  repose dans une rainure dont l'axe avoisine la direction  $V_1$   $V_2$  et dont la section répond encore à la figure 18.

 $V_3$  repose librement sur une cale plane (fig. 19 et 20).

Le dispositif fixe alors 3+2+1=6 paramètres et définit parfaitement la position du plateau, sans liaisons surabondantes ni contraintes.

# 1) Le plateau porte-objectif.

Il est destiné à supporter l'objectif. De forme circulaire, il est percé au diamètre 100mm pour laisser passer la lumière provenant de l'objectif.

Sa face supérieure est bien plane, afin d'assurer une pose convenable de l'objectif par la face inférieure du barillet.

Il comporte trois trous filetés à 120° les uns des autres. Deux d'entre eux reçoivent une vis molletée à extrémité conique arrondie, et munie d'un écrou de blocage.

Le troisième comporte un pied fixe. Ainsi la hauteur du plateau est toujours la même dès que l'horizontalité est réalisée par les deux autres vis en présence d'un niveau posé sur la face dressée. (Voir importance de ce réglage et calcul d'erreur au § 1). Voir figure 20.

Le plateau comporte aussi les deux cales destinées à recevoir les billes du système de fixation de l'objectif, l'une à

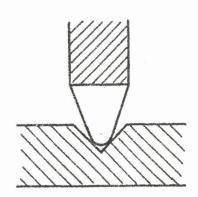
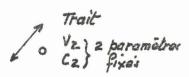


Fig. 18



Trou

V1 3 paramet.

C1 fixes

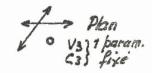
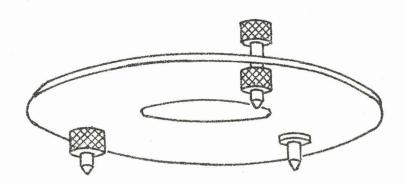
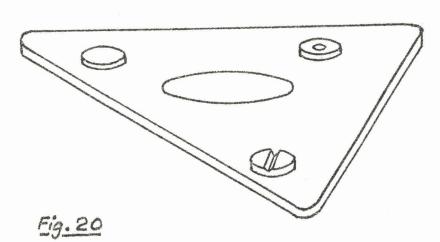


Fig. 19





....

face plane verticale, l'autre à rainure verticale.

Il comporte également les deux petits aimants du verrouillage de l'objectif (figure 17).

# 2) Le bain de mercure.

Sa position est assurée parlemême système que le plateau qui vient d'être décrit. Mais les 3 vis calantes sont réglables et permettent non seulement de régler l'horizontalité, mais aussi la hauteur du bain par rapport à l'objectif, c'est-à-dire de faire la mise au point, qui consiste à amener le plan focal à coïncider avec le plan du réticule.

Le paragraphe suivant est consacré plus spécialement à la description du bain de mercure.

#### IV - Le bain de mercure :

Cet élément fait du télescope zénithal un appareil d'encombrement réduit, mais surtout il permet de ramener le plan focal sur l'objectif et de rendre le réticule solidaire de celui-ci (cf. chapitre I).

"Si le sol transmet des trépidations il y a avantage à amortir rapidement les ondes superficielles; or, si le mercure ne mouille pas les parois et si, par conséquent, sa surface de raccordement est convexe, les ondes se réfléchissent un grand nombre de fois sur les bords du vase avec un amortissement faible. Au contraire si le mercure mouille le récipient et si la forme de celui-ci est évasée, la couche de mercure est très mince à l'extrême bord, et les effets de viscosité n'y sont plus négligeables : il y a amortissement rapide.

On aura une image grossière du phénomène en regardant la houle se réfléchir sur la paroi verticale d'un quai et s'amortir sur une plage en pente douce."(4)

La cuvette est donc tournée dans un bloc de cuivre. Un fond conique de pente 1/40 donne un très bon résultat en amortissant rapidement les vibrations accidentelles.

On profite de la propreté du métal fraîchement tourné pour l'amalgamer avec du mercure propre. Celui-ci est obtenu en

l'aspirant à l'aide d'une pipette dans la masse du liquide préalablement filtré à travers une baguette de jonc mastiquée dans le tube d'un entonnoir.

Le fond conique a 80mm de diamètre. Lors du remplissage il est essentiel de veiller à ce que la flaque de mercure ne touche pas le rebord vertical cylindrique de la cuvette. (fig. 21).

Compte tenu de l'ouverture de l'objectif égale à 90mm on peut donner à la flaque un diamètre de 70mm environ, ce quiest largement suffisant pour que le faisceau utile de lumière ne se réfléchisse pas sur le bord du liquide dont l'horizontalité pourrait être douteuse.

Remarquons que l'épaisseur du mercure n'atteint pas 1mm à son maximum au centre de la cuvette.

#### V - L'oculaire.

Nous avons jusqu'à présent décrit la partie fonctionnelle du télescope zénithal. Nous ne pourrons la mettre à profit qu'avec le moyen d'observer dans le champ d'un oculaire le plan du réticule.

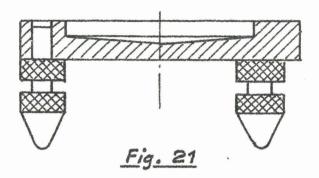
Un prisme, de section isocèle rectangle, placé au-dessus du réticule, capte le faisceau convergent après sa réflexion sur le mercure. Il renvoie ce faisceau, par réflexion, dans une direction perpendiculaire.

Tous les rayons utiles sont réfléchis totalement ainsi que nous allons le montrer :

L'objectif est caractérisé par D = 9cm. F = 149cm.

L'inclinaison maximum  $\alpha$  d'un rayon qui arrive sur le prisme en provenance du zénith et après traversée de l'objectif est telle que  $2\alpha = \frac{D}{F} = \frac{9}{149} = 0,060 \text{rd} = 206!$ . On ne tient pas compte de la seconde traversée de l'objectif qui a lieu au voisinage du centre optique (fig. 22).

Comme le champ angulaire observable est limité par le prisme à  $\frac{2}{149} \# 0,013$  rd = 46', c'est au maximum avec  $\frac{206! + 46!}{2} = \cdots$ 



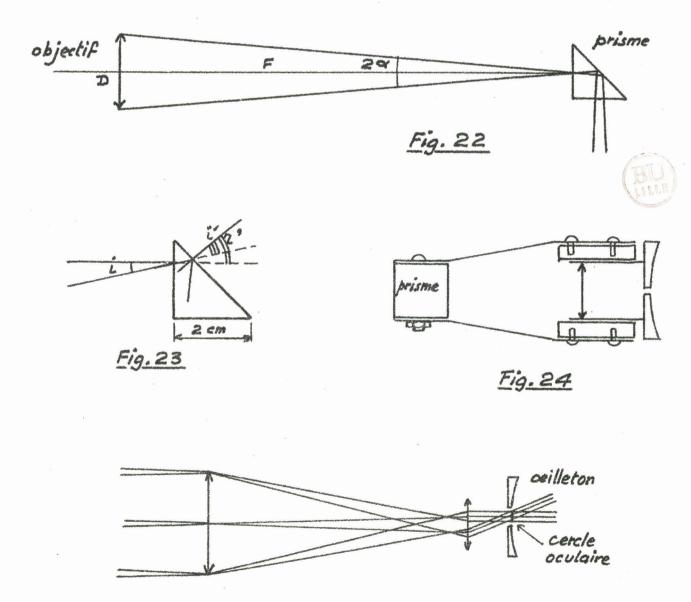
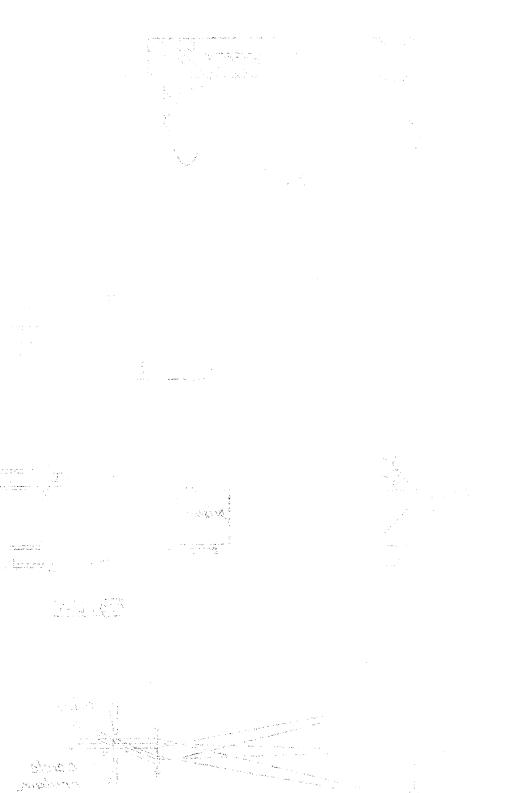


Fig. 25

i i



The second secon

d'inclinaison qu'un rayon utile arrive sur la première face du prisme (fig. 23) 126' équivallent encore à 0,037 rd.

$$i = nr$$

$$r = \frac{i}{n} = \frac{0.037}{1.5} = 0.025 = 86!$$

Donc après avoir été réfracté une première fois, ce rayon arrive sur la face réfléchissante du prisme avec l'incidence i' =  $\frac{11}{4}$  - 0,025 = 43°34'.

n sin i' = sin r' pour le rayon éventuellement réfracté d'où sin r' = 1,5 x 0,689 = 1,03.

Il y a donc bien réflexion totale.

L'objectif a une surface utile de 63,5cm<sup>2</sup>; le prisme recouvre 4 cm<sup>2</sup> de cette surface. Compte tenu du dispositif de fixation du prisme, c'est un peu moins que le douzième de la lumière incidente qui n'arrivera pas sur l'objectif.

Le prisme est maintenu par la légère pression d'une vis en même temps qu'un prisme d'aluminium de mêmes dimensions, entre deux bras de laiton de 1mm d'épaisseur, reliés au porte-oculaire (fig. 24).

L'oculaire est un cylindre qui coulisse dans le porte-oculaire. A une extrémité du cylindre est fixée la lentille de 26mm d'ouverture et 54mm de distance focale; à l'autre, un oeilleton de 6mm de diamètre un peu en avant du cercle oculaire (fig. 25).

$$G = \frac{F}{f} = \frac{149}{54} = 27,6.$$

Le diamètre du cercle oculaire, image de l'objectif est d #  $\frac{D}{G} = \frac{90}{27.6} = 3.3$ mm.

Deux pattes formant charnière, relient le porte-oculaire au plateau, permettant à l'ensemble prisme et oculaire de passer rapidement de la position précise de fonctionnement à la position "levé" dans laquelle on manoeuvre aisément l'objectif lors de son retournement (fig. 26).

En fait une légère modification de l'orientation du prisme permet d'incliner l'axe de l'oculaire par rapport à l'horizontale et d'approcher le prisme très près du réticule tout en

facilitant l'observation.

Il reste l'éclairage des fils dans le cas de l'observation visuelle. Il consiste simplement en une ampoule alimentée par une pile de 4,5 V. par l'intermédiaire d'unrhéostat. L'ampoule est placée tout près du bord de l'objectif, le plus près possible de l'axe optique de l'oculaire afin que l'éclairage rasant soit le plus symétrique qu'il est possible par rapport aux deux couples de fils.

Le rhéostat qui tient lieu d'interrupteur, est fixé sur le bâti, à la portée de l'observateur, pour qu'il puisse, en observant, choisir l'intensité optimale de l'éclairage.

#### VI- L'objectif.

De 90mm d'ouverture, l'objectif, achromatique, est constitué par un crown de rayons de courbures  $R_1=0.75m$  et  $R_2=0.48m$ , et par un flint de rayons de courbures  $R_1=-0.45m$  et  $R_2=2.20m$  (fig. 27).

Les épaisseurs sont respectivement 8mm et 9,3mm, prises sur l'axe optique, c'est-à-dire au centre de chaque lentille.

Ces rayons ont été mesurés au micromètre par l'intermédiaire de la flèche, comme le montre la figure 28.

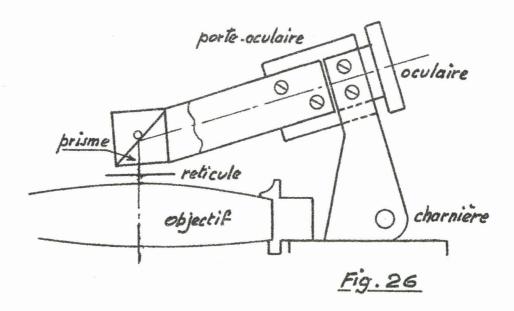
En effet, soit un arc de cercle de rayon R sous-tendu par une corde de longueur D, c étant la flèche correspondante (fig. 29):

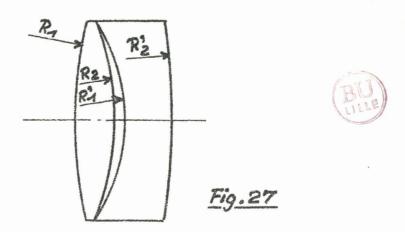
(fig. 29): 
$$\frac{\overline{D}^2}{8c} = c \times (2R-c) \cong 2cR \text{ car } \frac{2}{R} \text{ est un infiniment}$$
 petit; d'où  $R = \frac{\overline{D}^2}{8c} + \frac{c}{2} \cong \frac{\overline{D}^2}{8c}$ .

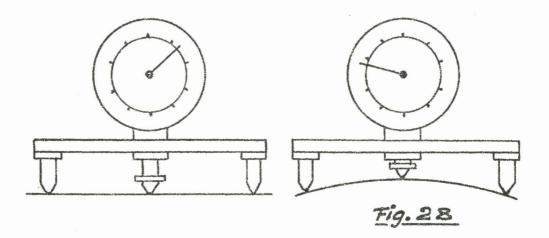
Les deux lentilles sont séparées par une mince couche d'air qui a environ 0,1mm d'épaisseur à son maximum.

#### Détermination des éléments cardinaux

Chaque lentille est une association de deux systèmes centrés formés chacun par un dioptre sphérique dont le sommet est confondu avec les points principaux et les points nodaux (fig. 30).







Le sens positif étant le sens de la lumière, le signe de R est connu si on pose  $R = \overline{SC}$ , où S est le sommet du dirptre et C le centre de courbure.

La formule de Gullstrand (cours optique I par Dévoré et Annequin) permet de calculer la vergence de la lentille à partir des 2 rayons de courbure, de l'indice n et de l'épaisseur & de la lentille.

$$\frac{1}{\hat{\varphi}} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{e(n-1)^2}{n R_1 R_2}$$

© représente la distance focale. D'une manière générale, si nous appelons H et F le point principal et le foyer relatifs à l'espace objet, H' et F' les mêmes éléments relatifs à l'espace image :

$$|\psi| = |\overline{HF}| = |\overline{H'F'}|$$
. (dans le cas d'une lentille).

Il s'agit de positionner F' et surtout H' par rapport au sommet  $S_2$  par exemple. Or le conjugué dans  $S_2$  du foyer image F', du dioptre  $S_4$  est précisément F'.

Imaginons un retournement du sens de parcours de la lumière. Nous

pouvons alors de la même façon que pour H $^{\iota}$  calculer la position de H par rapport à  $S_{\iota}$  .

Nous avons ainsi calculé les éléments des deux lentilles en adoptant pour indices les valeurs du crown et du flint ordinaires pour la raie D du sodium soit respectivement :

$$n_1 = 1,5179 \text{ et } n_2 = 1,6231.$$

$$\frac{S_1 H_1}{S_2 H_2} = 3,1_{mm}$$

$$\frac{S_1 H_1}{S_2 H_2} = -1,3_{mm}$$

$$\frac{S_1 H_1}{S_2 H_2} = -7,2_{mm}$$

Ces résultats sont portés sur la figure 31 où toutes les longueurs ont été multipliées par 10.

Déterminons enfin les éléments cardinaux de l'ensemble des deux systèmes centrés associés que nous venons de définir.

Soit  $F_1$ ,  $F_1$  et  $F_2$ ,  $F_2$  les foyers objet et image des deux systèmes, F et  $F^1$  les foyers du système équivalent.

Nous utiliserons encore les formules de Newton en remarquant que F' est le conjugué de F' $_1$  dans le 2ème système et que F admet F $_2$  comme conjugué à travers le 1er système :

$$\frac{\overline{F_1F \cdot F_1'F_2} = f_1 \cdot f_1'}{\text{d'où } \overline{F_1F}} = \frac{f_1 \cdot f_1'}{\overline{F_1'F_2}} = \text{et } \frac{\overline{F_2F_1'} \cdot \overline{F_2'F'} = f_2f'_2}{\overline{F_1'F_2'}}, \text{ qui situent } F \text{ et } F' \text{ par}$$

rapport à F<sub>1</sub> et F'<sub>2</sub> déjà connus.

L'étude de l'association des systèmes centrés permet encore de calculer HF puis H'F', c'est-à-dire finalement de situer H et H' sur la figure précédente. En effet

$$\overline{HF} = \frac{f_1 f_2}{F_1^{\dagger} F_2} \text{ et } \overline{H^{\dagger} F^{\dagger}} = -\frac{f_1^{\dagger} f_2^{\dagger}}{F_1^{\dagger} F_2}$$

$$\frac{\overline{H_4'F_4'}}{\overline{H_2'F_2'}} = 0,5663m. \text{ pour le crown.}$$

$$H_1 H = 1,2mm$$

$$\overline{H_2^{\dagger}H^{\dagger}} = -2,1 \text{mm}.$$

$$H^{\dagger}F^{\dagger} = -HF = 1496.8mm$$

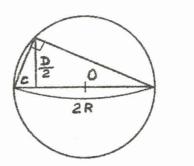
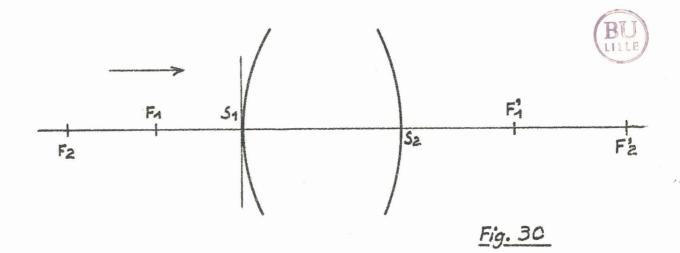


Fig. 29



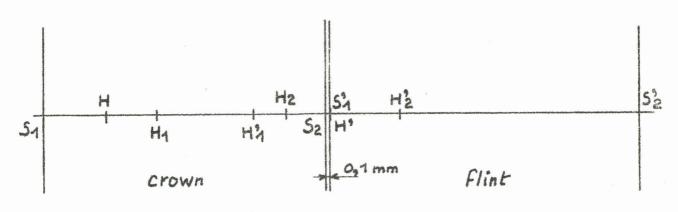


Fig. 31

and the second s

) — po

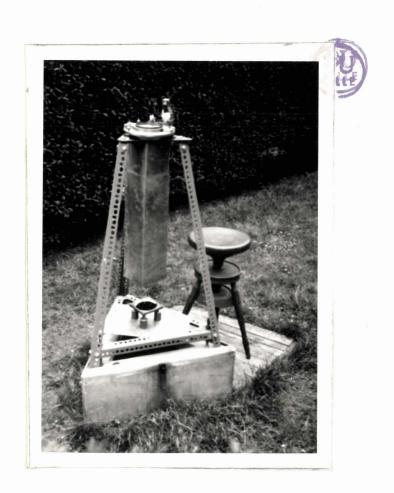
Ce dernier résultat concorde de manière satisfaisante avec la mesure de f' au laboratoire : la mesure de la position relative de l'objectif par rapport à un objet A et à son image A', puis l'application de la formule de conjugaison entraîne : f' = 149cm à partir de la face inférieure de l'objectif.

### VII - Le bâti:

C'est un trépied fabriqué en profilés "L", boulonnés à leurs parties supérieures à une plaque d'acier triangulaire qui supporte le plateau porte-objectif par l'intermédiaire des 3 cales "trou-trait-plan".

A la partie inférieure du trépied est lié un second plateau, rigide, sur lequel est positionné le bain de mercure par le même dispositif "trou-trait-plan" (fig. 32).

Le bâti repose sur un socle de bois auquel il est boulonné. Ce socle est lui-même lié à 3 trois gros piquets de bois profondément enfoncés dans le sol.



# Chapitre IV

# ALIGNETENT DES DIVERS ORGANES

#### MISE AU POINT.

Le calcul et la fabrication des divers organes du télescope zénithal, constituent un problème. Le réglage optique, après montage est un autre problème qui a nécessité un travail particulier.

J'ai choisi comme plan de référence le plateau inférieur en aluminium, qui supporte le bain de mercure. Ce plateau étant rendu horizontal au laboratoire, il importe, lors de l'installation du télescope sur son socle de veiller à le rendre horizontal à nouveau.

I-BAIN: Le fil à plomb permet de repérer sur le plateau inférieur la verticale passant par le centre du plateau supérieur et d'y faire coïncider l'axe de la cuvette conique en cuivre rouge amalgamé, qui constitue le bain de mercure. A la suite de cette opération on peut placer et fixer les cales qui supportent les vis calantes. (fig. 32)

Pour que la mise au point ne varie pas d'une observation à l'autre, il importe qu'il y ait toujours la même épaisseur de est mercure. Ceci réalisé avec une précision très satisfaisante lors du remplissage du bain, en veillant à ce que le diamètre d de la "flaque" soit très proche du maximum possible, c'est-à-dire du diamètre D de la partie conique, sans toutefois y être égal.

On peut comparer ces diamètres à 4mm près (2mm sur les rayons), ce qui fixe la hauteur de la surface du mercure à  $2 \times \frac{1}{40} = 0,05$ mm près. La répercussion sur la mise au point peut donc être au plus égale à 0,05 x 2 = 1/10e mm.

Le mercure doit être exempt d'eau et d'impuretés telles que les poussières et surtout l'oxyde qui recouvre assez rapidement le liquide à l'air libre. Pour cela on soutire le mercure dans son flacon à l'aide d'une pipette, on lave abondamment la cuvette avec du mercure propre pour chasser toute trace d'oxyde

formé depuis l'observation précédente. On prend soin également de recouvrir le bain après chaque observation.

#### II - Prisme:

Il est dans la bonne position lorsque l'axe optique de l'oculaire et l'axe optique de l'objectif sont conjugués par rapport au plan réfléchissant du prisme, et le coupent au centre de sa partie utile.

Plaçons l'oeil sur l'axe optique de l'oculaire.

Pour y parvenir rapidement à tout moment, commençons par fixer un oeilleton à une certaine distance de l'oculaire.

Pour cela, il suffit d'appliquer un miroir sur la face de tournage du porte oculaire qui est plane et perpendiculaire à l'axe optique : un observateur doit voir à travers cet oeilleton auxiliaire, s'il est bien placé sur l'axe, l'image de son oeil au centre du porte-oculaire.

Le miroir est ensuite enlevé; nous disposons alors du moyen de placer instantanément l'oeil sur l'axe optique de l'oculaire (fig. 33).

Dans cette position, nous devons apercevoir, en l'absence de l'objectif, l'image du bain de mercure dans le prisme.

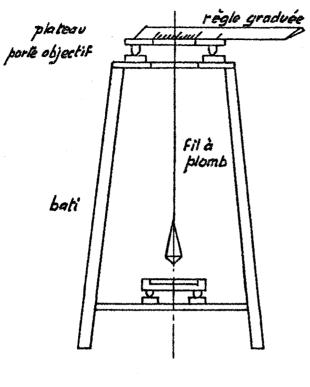
Si cette image n'est pas centrée sur la partie utile du champ (fig. 34), il convient d'agir sur les différents paramètres de liberté du prisme, jusqu'à ce que la condition soit réalisée, avec la condition supplémentaire que les quatre côtés du prisme doivent être à égale distance du bord de l'objectif (ce bord est défini par le barillet).

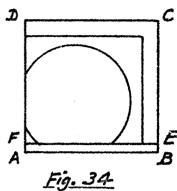
Ces paramètres de liberté doivent être (fig. 35) :

- rotation autour des axes vertical et horizontaux AA', BB', CC'.
- translation dans un plan horizontal du point C, centre de la partie utile de la face réfléchissante.

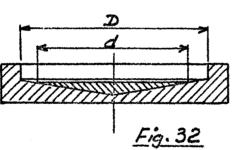
Tous ces paramètres de liberté existent avec une amplititude suffisante pour parvenir au réglage :

- rotation autour de AA' par translation horizontale des bras





ABCD: face du prisme du coté de l'oculaire ABEF: conjugué de la face coté objectif par rapport au dioptre ABCD



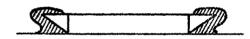


Fig. 36

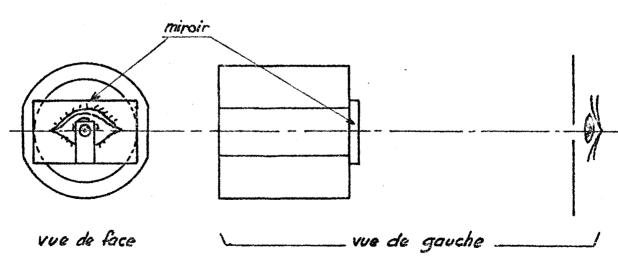


Fig. 33

A Section 1

au niveau des vis  $V_1$  et  $V_2$  grâce à un certain jeu des trous de fixation; en même temps contrôle des angles de pliage  $D_1$  et  $D_2$ .

Ce réglage peut être opéré sur les deux pièces, symétriques. C'est le plus délicat.

- rotation autour de BB' grâce à la vis de pression qui maintient le prisme en place.
- rotation autour de CC' si cela est nécessaire, par translation au niveau des vis  $V_1$  et  $V_2$ .
- translation du point C dans un plan horizontal. Elle est possible dans tous les sens au niveau des vis V<sub>3</sub> et V<sub>4</sub> par un certain jeu des trous de fixation du parallélépipède P.
   Ce réglage étant réalisé, l'axê optique de l'oculaire est le conjugé par rapport au prisme de l'axe optique de l'objectif.

### III - Réticule.

Il faut poser la bague de laiton sur laquelle sont fixés les fils, au milieu de la lentille supérieure de l'objectif.
Cette pièce, circulaire, doit être concentrique au rectangle qui constitue le champ du prisme. Cette condition est réalisée et vérifiée de manière satisfaisante en plaçant là encore l'oeil sur l'axe optique de l'oculaire par la méthode précédémment décrite.

A ce stade, le retournement de l'objectif sur son plateau ne doit pas translater le réticule dans le champ, ce qui permet de vérifier le bon positionnement du prisme.

On fixe définitivement le réticule en laissant tomber une goutte de paraffine en deux points diamètralement opposés de la bague. Ces points sont choisis de manière à ne pas fondre la cire qui colle déjà les fils à leur support (fig. 36).

En réalité cette opération de fixation du réticule sur l'objectif ne s'effectuera qu'au cours de l'opération suivante, pendant la mise au point au laboratoire.

## IV - Mise au point.

A ce stade, les différentes pièces optiques sont alignées :

l'axe de l'objectif coïncide avec celui du bain de mercure; cet axe commun, vertical, a pour conjugué dans le prisme l'axe de l'oculaire.

Il reste à régler le tirage de l'oculaire qui doit permettre à l'observateur de voir nettement les images qui se forment dans le plan focal, puis à régler la hauteur du bain de mercure de manière que l'image stellaire se forme plus précisément dans le plan du réticule.

Le tirage de l'oculaire est immédiat, compte tenu du fait que les fils seront très près de la surface de l'objectif.

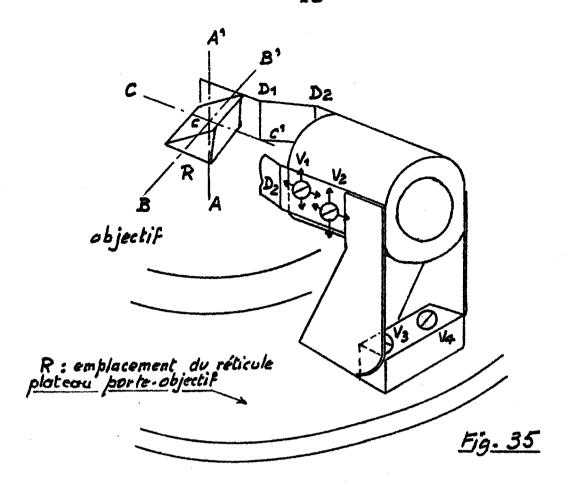
Le réglage du bain de mercure peut être réalisé de 2 manières totalement différentes. Voyons d'abord la méthode que j'ai effectivement utilisée, pour des raisons de matériel, elle est aussi plus courte à exposer.

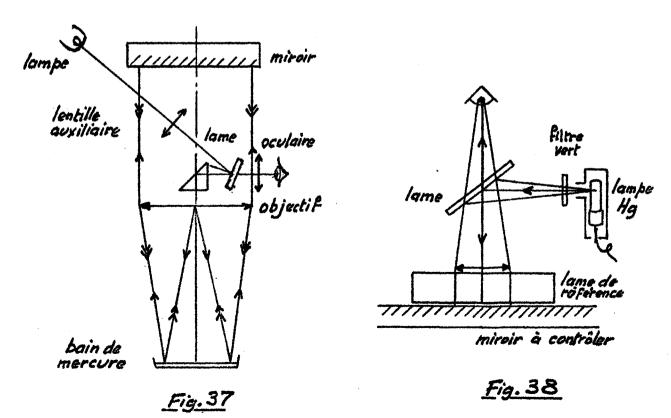
### 1ère méthode :

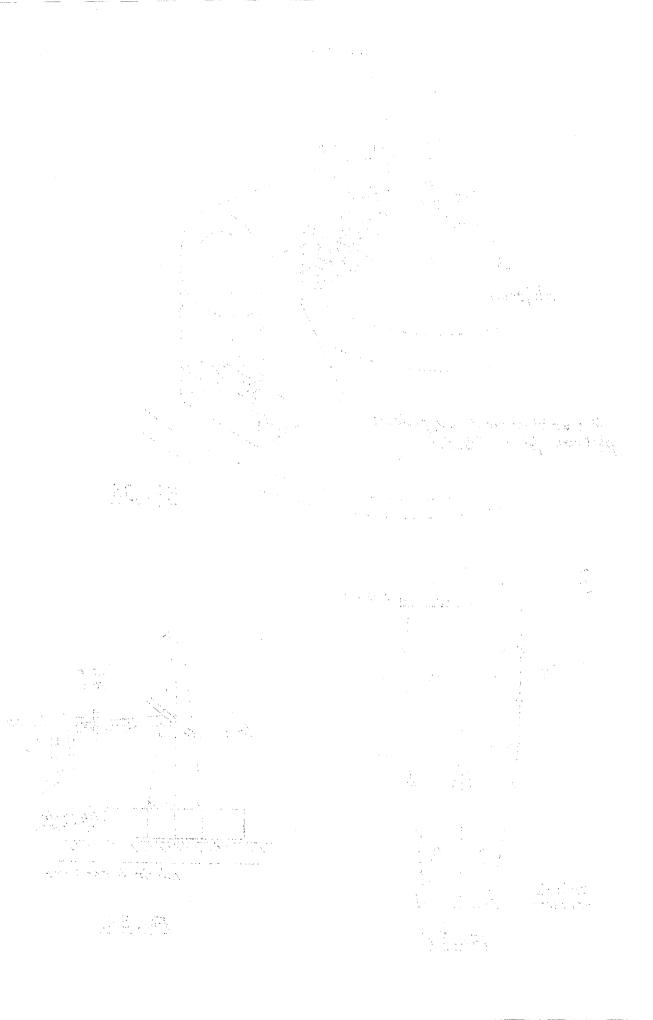
La distance focale mesurée à partir de la face inférieure de l'objectif étant égale à 149cm environ, et compte tenu du fait que les rayons lumineux traversent à nouveau l'objectif, avant de converger sur le plan du réticule, il est possible de calculer à quelques millimètres près la position du bain de mercure mesurée à partir d'une face de l'objectif.

Une amélioration est possible avec l'observation directe des étoiles, le réticule monté : l'observateur agit sur le tirage de l'oculaire pour voir les fils nettement. Puis il tire ou entre l'oculaire pour mettre au point sur l'étoile. Le sens et la valeur de ce déplacement renseignent sur le sens et la valeur du déplacement à donner au bain de mercure pour que la mise au point soit simultanée. Le déplacement du bain est évidemment égal à la moitié du déplacement effectué sur l'oculaire.

Le réglage plus fin se fait de la manière suivante : si l'image de l'étoile est au-delà du réticule par rapport à l'oeil de l'observateur, celui-ci s'en rend compte directement par l'effet de parallaxe en translatant l'oeil dans un va-et+vient perpendicu-laire à l'axe optique de l'oculaire. Si l'image est au contraire trop près, il le distingue également fort bien.







Cette constatation m'a permis un ultime réglage des vis calantes pour fixer la hauteur du mercure à 0,1 mm près environ.

2ème méthode dite d'autocollimation.

La seconde méthode permet d'aboutir directement au réglage fin avec la précision précédente, mais à la condition de posséder un miroir optiquement plan.

L'expérience que j'ai réalisée au laboratoire est la suivante :

Le télescope est installé à l'aide du niveau à bulle pour que l'axe optique de l'objectif soit vertical (fig. 37).

On dispose au-dessus de l'objectif un miroir plan, horizontalement (dans la mesure où on peut se référer à la face opposée de la lame qui constitue le miroir); l'ensemble du télescope est en état de marche normale.

On ajoute provisoirement une lame à faces parallèles entre le prisme et l'oculaire, sur le trajet habituel des rayons lumineux. Cette lame, tout en permettant d'observer à travers l'oculaire, éclaire par réflexion vitreuse, tout le champ de l'instrument lorsqu'elle est bien positionnée. Une toute petite partie de la lumière est arrêtée par les fils.

L'éclairage est une ampoule à filament, qu'on pourra si on le désire recouvrir par un verre dépoli.

Considérons quelques instants que le réticule se comporte comme une source. Les rayons qu'il émet divergent sur le bain de mercure et après réflexion sortent de l'objectif en un faisceau parallèle ou presque parallèle. Ils se réfléchissent alors sur le miroir horizontal et font le même trajet en sens inverse pour converger à nouveau et former une image.

Si le réticule est dans le plan focal de l'objectif, il est clair que l'image vient se former précisément dans ce plan focal et elle est observable dans l'oculaire avec le même tirage qui permet de voir l'objet lui-même. C'est cette condition qui, une fois réalisée permet d'affirmer que le bain de mercure est à la bonne hauteur.

Mais il va de soi qu'il est délicat de rendre le miroir auxiliaire suffisamment horizontal pour que l'image soit dans le champ de l'oculaire, compte tenu de l'étroitesse du champ. Aussi, dans la lère phase de l'expérience, la source de lunière est le filament de la lampe, dont l'image reste encore très brillante, même après avoir subi six réflexions dont une vitreuse et avoir été réfracté vingt six fois entre le départ à la sortie de l'ampoule et l'arrivée sur l'oeil.

On forme l'image du filament dans le plan du réticule par une lentille supplémentaire que l'on place entre la lampe et la lame à faces parallèles.

Il suffit de former cette image sur un disque de papier posé sur l'objectif en l'observant à travers l'oculaire. On amène cette lère image au centre du champ.

On enlève alors le disque de papier et on règle le miroir de manière à amener l'image par autocollimation au centre du champ également. On peut supprimer la lentille auxiliaire après avoir effectué, s'il y a lieu, une première mise à hauteur du bain de mercure.

C'est alors seulement qu'on met le réticule en place et qu'on recouvre le filament par un verre dépoli.

Si le réticule et son image par autocollimation (sombre sur fond éclairé) ne sont pas nets simultanément dans l'oculaire, il y a lieu de corriger la hauteur du mercure jusqu'à ce que cette condition soit réalisée.

## Discussion de la méthode d'autocollimation.

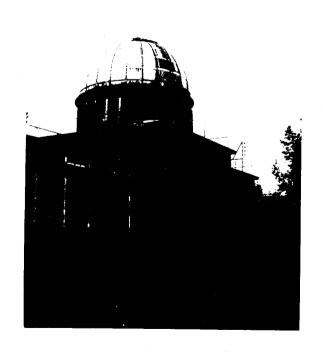
J'ai mis au point cette expérience telle qu'elle vient d'être décrite, et j'ai ainsi réalisé ce réglage fin du bain de mercure. Mais il s'est avéré que ce "réglage fin" était largement différent de la mise au point réelle.

Cette erreur était due au fait que le "miroir plan" n'était pas véritablement plan. Ce miroir provenait pourtant du sidérostat qui a d'ailleurs servi, lors des premiers essais d'observation, à provoquer des passages artificiels au voisinage du zénith.

Je disposais d'une épaisse lame, à faces parallèles et planes à  $\frac{\lambda}{4}$ ; ce qui permit d'observer les franges de lame d'air par l'expérience illustrée figure 38.

Le nombre maximum de franges et leur comportement en fonction de la variation d'épaisseur de la lame d'air permit de déceler une concavité de rayon minimum égal à 750 mètres. Si la surface correspondante avait été sphérique, il eût été possible de compenser la translation correspondante de l'image par une correction sur le réglage du bain de mercure, correction calculable et égale en fait à 1,5nm.

En réalité, les franges avaient une ellipticité trop marquée pour prétendre à une correction convenable.



 $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R$ 

#### CHAPITRE V

#### REDUCTION

Dans la suite nous appellerons "o" les instants observés des passages sur les fils, "c" les instants de passage calculés pour des fils dont le centrage et l'azimut sont supposés parfa; ts.

#### I- Calcul des "c".

Le catalogue AGK2 donne les coordonnées α et δ des étoiles dans la zone qui nous intéresse c'est-à-dire de 50° 24' à 50°50', et pour des magnitudes allant jusqu'à 12 et plus. Le catalogue contient donc certaine ent les étoiles que nous avons observées dont la magnitude ne dépasse guère 8.

Les coordonnées sont rapportées au point J de 1950.0.

La réduction au jour (voir paragraphe V) fournit  $\alpha$  et  $\delta$  du jour de l'observation.

Appelons H l'angle horaire d'une étoile observée à l'instant sidéral  $\theta$ .

Lors du passage au méridien,  $H=\theta-\alpha=0$  et  $\theta=\alpha$ , facilement transformable en Temps Universel (TU).

 $\label{eq:Appelons} \mbox{Appelons $t_o$, l'instant TU, calculé, du passage de l'étoile au méridien.}$ 

Calculons les instants t et t' de passage sur deux fils qui admettent pour bissectrice le méridien et se coupant au zénith, en faisant au préalable deux hypothèses simplificatrices :

- l'étoile admet une trajectoire rectiligne pendant son passage dans le champ.
- la vitesse angulaire v de n'importe quelle étoile du champ est la même, ce qui revient à assimiler s à  $\varphi$  pour le calcul de cette vitesse :  $v = \frac{2 \, \text{Tr} \cos \, \varphi}{24 \, \text{x} 60 \, \text{x} 60}$  radian par seconde sidérale.

Alors: 
$$t_0 = \frac{t + t!}{2}$$

Sur la figure 39, nous voyons que  $ZT_0 = z = distance$  zénithale lors de la culmination.

z est aussi égal à  $\delta$  -  $\mathcal{C}$ 

Compte tenu des sens positifs (Est→ Ouest et Sud→ Nord) nous écrirons :

 ${\rm ZT_o} \ = \ {\rm T_oT} \ = \ {\rm z} \,, \ \ {\rm mesur\acute{e}s} \ \ {\rm en} \ \ {\rm unit\acute{e}s} \ \ {\rm de} \ \ {\rm distances} \ \ {\rm angu-laires.}$  laires.

En unités de temps :  $T_oT = \frac{z}{\cos\delta} \sim \frac{z}{\cos\zeta}$  , ce qui permet de déduire t et t' par

t, t' = 
$$t_{0} \pm \frac{z}{\cos \varphi}$$
 (figure 39)

A partir de t (ou t') on déduit les instants de passage sur chaque fil de la couple par :  $t_1$ ,  $t_2 = t + \triangle t$  et  $t_3$ ,  $t_4 = t' + \triangle t$ , où  $2 \triangle t$  représente le temps mis par l'image stellaire pour passer d'un fil à l'autre.  $\triangle t$  est évaluée à partir de la distance d'entre les 2 fils, mesurée au microscope :  $2 \triangle t = \frac{d}{F} \sqrt{2/v} = \frac{d\sqrt{2}}{F} / \frac{2 \pi \cos \varphi}{86 400}$  s.sid.

$$= \frac{d\sqrt{2}}{F} / \frac{2\pi \cos \theta}{86 \cdot 164} \quad \text{s. TU (fig. 40)}$$

Notons que dans ce calcul, les coordonnées de l'Observatoire, interviennent telles qu'elles sont connues actuellement, dans 0 pour la latitude L, dans z pour la latitude C. Nous verrons par le graphique III, comment déceler d'après le résultat des observations l'erreur \( \Delta \) L sur L et l'erreur \( \Delta \) sur \( \Delta \), apportant une meilleure précision à la connaissance des coordonnées.

Le calcul précédent est programmé et effectué, de même que la réduction au jour sur calculatrice IBN 1620 en langage Algol.

Les données du calcul sont, outre la date de la soirée et les coordonnées de catalogue des étoiles observées, la distance entre les fils et les constantes de translation (voir chapitre III, § "géométrie du réticule").

Les résultats sont les instants de passage de chaque étoile sur les 4 fils.

 $V_{o}ici~un~exemple~des~r\'{e}sultats~de~la~calculatrice,~pr\'{e}sen-tant~pour~3~\'{e}toiles,~\grave{a}~la~date~du~28~avril~1966,~le~num\'{e}ro~AGK2,\\ \alpha~et~\xi~pour~cette~date,~les~4~instants~de~passage~pour~chaque~position$ 

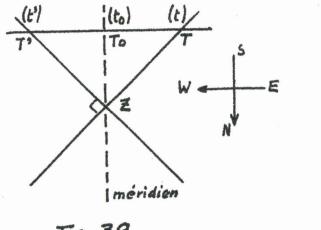


Fig. 39

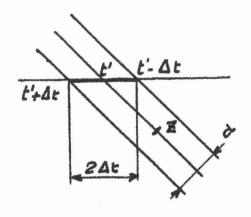


Fig. 40

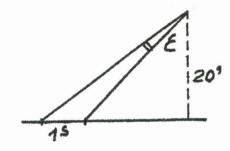
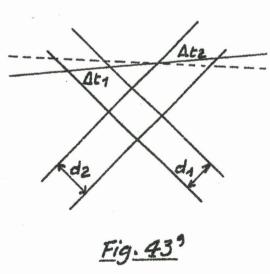
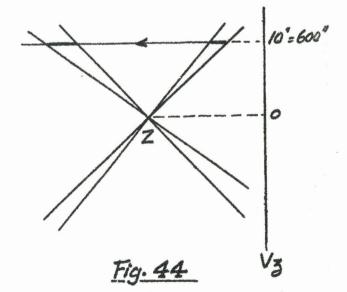


Fig. 42 calcul de E









de l'objectif. Ces instants ne sont pas les mêmes selon la position de l'objectif du fait qu'il existe une constante de translation du réticule par rapport à l'objectif ce qui explique qu'il existe 8 nombres par étoile.

0000000028	0000000004	0000001966	
NºAGK2 0000000897	<=11023023 <sup>2</sup> 2	0 δ= 5004 1014,2	9 (reduction an jour)
2004404757	2004503237	2004504149	2004602629 punition 1
2004405477	2004503957	2004600789	2004605269 position 2
0000000916	110440227	0 500450150	8
2100501120	2100505600	2100603368	2100702118
2100501840	2100600320	2100700278	2100704758
0000000938	120090110	9 500440 <b>183</b>	4
2103000147	2103004627	2103101476	2103105956
2103000867	2103005347	2103104116	2103202596

Les premières observations permettent de déterminer les constantes de translation et de les introduire dans le programme, ceci dans le but de rapprocher de la valeur zéro les termes "o-c" du tableau (5) (paragraphe suivant).

## II - Détermination des "o" et des "o-c".

# 1) Principe.

Il s'agit de déterminer l'instant précis du passage de l'étoile derrière un fil. L'observateur est en place quelques instants avant le passage calculé précédemment. Au moment où le passage a lieu, il appuie sur un contacteur relié par un câble au laboratoire. Il résulte une impulsion qui peut enregistrer l'heure sur un chronographe.

Or, on dispose du "Universal Eput and Timer Beckman", qui contient une horloge à quartz, un dispositif capable de compter le temps précis écoulé entre 2 impulsions et un dispositif générateur de tops à intervalle régulier de 10 secondes. On peut contrôler de temps à autre le décalage de ces tops de 10 secondes par rapport aux signaux horaires.

Le principe de détermination des "o" revient à entrer le top du contacteur dans l'appareil qui compte le temps écoulé jusqu'au prochain top de 10 secondes.

L'ambiguité des 10 secondes est éventuellement levée par un simple chronomètre.

Voici la marche à suivre qui aboutit finalement à l'instant TU du passage:

## 2) Mode opératoire :

- Mettre en marche l'horloge à quartz
- Entrer avec le contacteur précédent une impulsion à l'instant x h0 m0 s (modulo 10 s), fourni par les signaux horaires.
- Relever le chiffre qui s'affiche peu après sur le compteur dès que le premier top de 10 secondes arrête le comptage.

Soit c, ce chiffre décimal inférieur à 10.

- Mettre en marche le chronomètre c secondes après la minute ronde a (0<sup>m</sup> ou 30<sup>m</sup> si possible). Le chronomètre est alors synchronisé avec les tops de 10 secondes.

Si lors d'une observation, le compteur s'arrête en marquant b secondes (chiffre décimal inférieur à 10) et qu'à ce moment le chronomètre marque la valeur d (en minutes et secondes multiples de 10), nous avons :

T = d-b+c+a instant TU du passage, modulo 30 minutes.

Si le passage est prévisible avec assez de précision pour qu'il soit inutile de repérer la dizaine de secondes, alors :

T = c-b (modulo 10 secondes).

Les tableaux suivants illustrent les différentes phases qui aboutissent finalement au calcul des "o-c" (figure 43).

3) Résultat brut d'une soirée d'observation.

28	avril	1966
20	Cl V I I I	100

$$c = 2^5,0$$
  
 $a = 0^m 0^s 0.$ 

Nº AGK2	Nº AGK2 Position	Couple A				Couple B			
11- 110112	objectif	_		chrono			_	chrono	quartz
		d.	Ъ	d	b	d	b	d	b
	andidigen ougster dig fann i Ydynney dûn'n i'r gennon. An i'n derstag sidd in yr in genn gewy bwy ywy	m s	g	m S	S	m s	S	m s	s
897	1	14 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup>	5~5	15 40	9~9	16"00"	5~9	17 40	4~2
916	2	4 10	5 5	6 00	8 3	6 50	4 5	7 30	2 4
938	2	0 00	31	0 50	71	1 20	5 8	2 10	0 9
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	u	21		2					

4) Heures TU calculées par T = d-b+c = "o".

	Couple A		Couple B			
897	20 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> ,5	45 <sup>m</sup> 32 <sup>s</sup> ,1	45 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup> ,1	46 <sup>m</sup> 37 <sup>s</sup> ,8		
916	21 5 6 ,5	5 53 ,7	6 47 ,5	7 29 ,6		
938	21 29 58 ,9	30 44 ,9	31 26 ,2	32 9 ,1		



5) "o-c" déduits des 2 tableaux précédents

370 46770	,	o-c(s)				Moyennes (s)		z = 5.4
Nº AGK2	Position objectif	A•	A+	B •	B+	, A	В	(en ')
897	1	-1,1	-0,3	14,6	11,5	-0,7	13,0	+4,3
916	2	-11,9	-9,5	-15,3	-18,0	-10,7	-16,7	+8,3
938	. 2	<b>-9,</b> 8	-8,6	-14,0	-16,9	-9,2	-15,5	+7,3

# III - Résultats - interprétation des courbes.

On peut représenter pour plusieurs soirées en fonction de z les "o-c" de chaque fil des deux couples dans les deux positions. Cela fournit 8 droites, représentées sur les graphiques I et II qui seraient identiques en cas d'orientation et de centrage parfaits du réticule sur l'objectif. Les représentations de ces 8 droites apportent certaines informations sur la géométrie du réticule, en particulier la distance et le parallélisme des fils.

On peut alors réunir les o-c relatifs aux deux fils d'un même couple. Cela entraîne la disparition de certains paramètres mais permet d'obtenir plus directement, sur un graphique où ne figurent plus que 4 droites, d'autres informations, en particulier les paramètres de centrage (constantes de translation).

Remarquons que ces 4 droites sont parallèles 2 à 2.

La pente commune de 2 droites met en évidence l'azimut d'un couple, tandis que la moyenne des ordonnées à l'origine avec la même donnée relativement à l'autre couple permet de calculer les corrections en latitude et en temps.

Dans tous les cas, les droites peuvent être définies par moindres carrés (paragraphe VI) avec au surplus une contrainte de parallélisme selon le cas.

On obtient les résultats suivants :

1) Graphique 1: "o-c" = f(z) pour les 2 fils du couple A dans les 2 positions de l'objectif.

A chaque fil correspond deux droites repérées par une astérique sur le graphique (fig.43 bis)

Pour une abcisse donnée la différence d'ordonnée entre les deux droites relatives à une même position peut être due

- 4- à une valeur inexacte introduite dans le calcul des c de la distance entre les 2 fils d'un couple.
  - 2- à un défaut de parallélisme entre ces deux fils.

L'écart entre les deux droites relatives à la position 1 varie en ordonnée de 1,8s à 0,7s, soit de 1,1s; entre 2,1 et 1,2s

pour la position 2. Soit de 0,9s. La variation de l'écart, de 1 s en moyenne permet de calculer le défaut de parallélisme ou l'angle des deux droites (fig. 42).

1s = 
$$\frac{\cos^2}{4}$$
 = 0,16:  $\varepsilon = \frac{0.16 \frac{\sqrt{2}}{2}}{20 \times \sqrt{2}}$  = 0,004 rd

La moyenne de l'écart, soit 2,9 s est la modification à apporter au terme 2 t qui intervient dans le calcul des c et qui doit ici être augmenté.

## 2) Graphique II:

Les mêmes considérations sont applicables àv couple B. Il résulte que le parallélisme semble parfait au degré de précision où l'on travaille.

Il convient de réduire cette fois 2 at dans le calcul des crelativement au couple B, d'une valeur égale à 2,6s.

#### 3) Graphique III:

Les "o-c" relatifs à une paire de fils (A ou B) sont moyennés, ce qui fait disparaître la différence d'ordonnée précédemment citée, quelle que soit son origine, 1 ou 2.

Le graphique III est donc identique à ce que seraient les deux précédents, si les fils étaient parallèles et après avoir apporté au calcul les dites corrections, ou bien, dans le cas de non parallélisme, après avoir également corrigé les c du défaut de parallélisme.

En effet, à cette condition, on peut mettre en place dans le graphique III, les observations isolées (1fil sur 2) qu'il serait inadmissible de ne pas utiliser.

Afin d'éviter la correction du défaut de parallélisme, il faudra dans la réalisation du projet tracer des traits parallèles.

La différence d'ordonnées entre les deux droites parallèles relatives à un fil dans les deux positions n'est autre que le double du défaut de centrage du fil sur l'objectif. La moitié de cette différence est la correction à apporter à t; et t<sup>i</sup><sub>2</sub>(pour là couple A). Une telle correction amènerait les deux droites à être confondues.

Elle est de  $\pm$  13,1 s pour le couple B tandis qu'elle est de  $\pm$  3,8 spour A.

Les instants calculés c, donnent après les deux corrections indiquées des c'.

Alors les droites o-c' = f(z) se réduiraient à 2 droites A et B d'ordonnées à l'origine  $\overline{OA_o}$  et  $\overline{OB_o}$ . Ces droites ne sont pas reproduites sur la figure mais  $A_o$  et  $B_o$  sont obtenues comme moyennes des ordonnées à l'origine des deux droites relatives à chaque couple.

## Interprétation de la pente d'une droite.

Cette pente est due à l'angle (très petit) qui existe entre le fil vrai tel qu'il est fixé à l'objectif, et son homologue théorique; cet angle est l'erreur d'azimut du fil vrai par rapport à l'azimut +45° ou -45° qui est celui du fil théorique.

Pour le graphique III, la pente d'une droite représente plus précisément l'angle de la bissectrice de deux fils d'un couple avec l'azimut 45°.

Faisons le calcul pour les 2 fils moyens A et B : sur le graphique III,  $\triangle$  (o-c) = 6,6s (moyenne des  $\triangle$  (o-c) pour les deux droites A), pour z = -10 (fig. 44).

Or la vitesse emgulaire d'une étoile voisine du zénith de Lille est  $\frac{15"\cos \bigcirc}{4}$  x  $\frac{366.2}{365.2}$  = 9,544"/s. solaire.

$$6,6 \times 9,544 = 62"9.$$

Le défaut d'azimut est donc pour A:

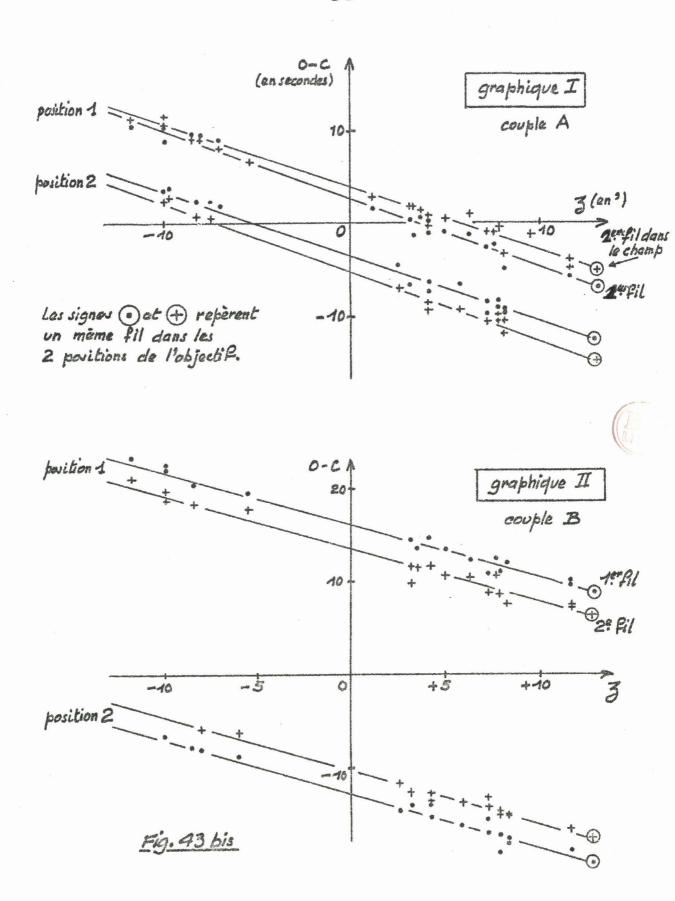
$$\frac{62.9}{\sqrt{2(600 \sqrt{2})}} = 5.24.10^{-2} \text{rd}.$$

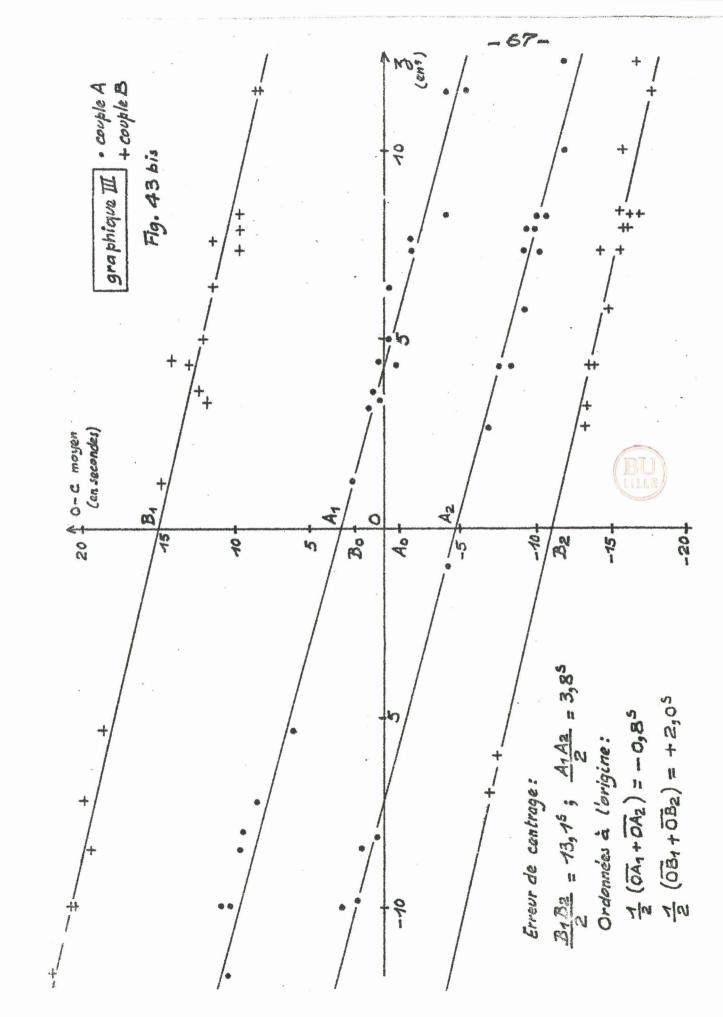
De même pour B :

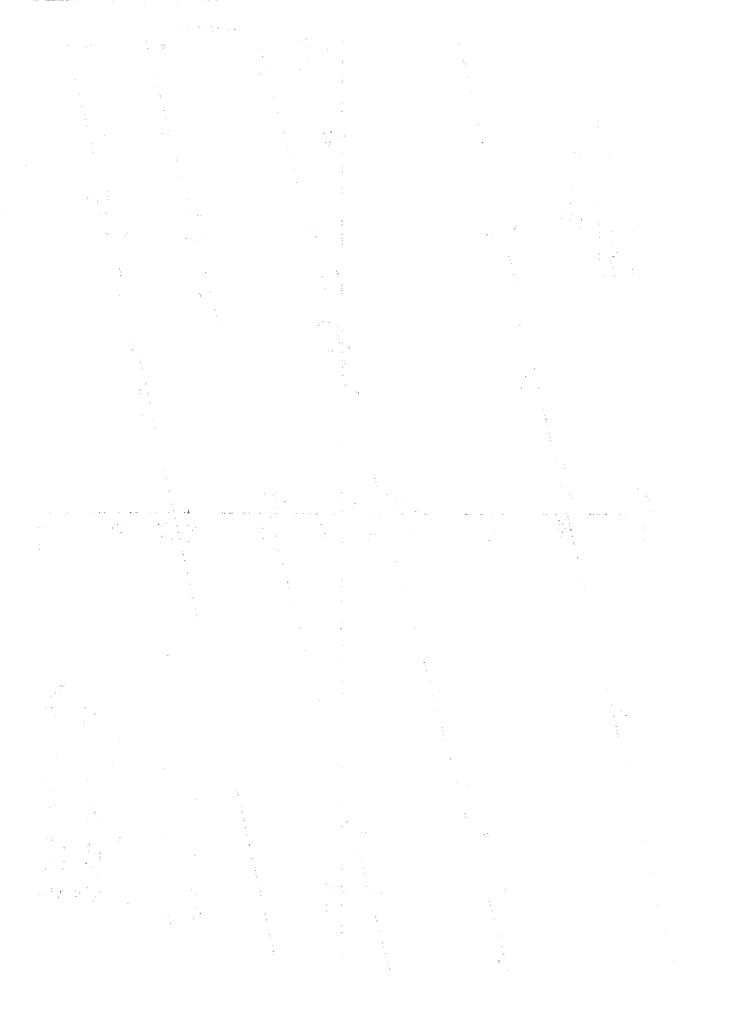
$$\frac{5.6 \times 9.544''/s}{1200} = 4.45.10^{-2} rd.$$

La bissectrice de se couple A est donc orientée à + 5,24.10<sup>-2</sup> rd par rapport à l'azimut + 45°.

La bissectrice de la couple B à + 4,45.10<sup>-2</sup> rd par rap-







The state of the

En toute rigueur l'instant de passage sur ce que nous avons appelé fil moyen est l'instant de passage sur la bissectrice. Or si est l'angle, petit, des deux fils presque parallèles du réticule vrai, ou montre aisément que

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{\epsilon}{4} (t_2 - t_1)$$
 au 1er ordre.

La détermination précédente de 2 nous permet d'admettre :

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}$$
, commettant ainsi une erreur maximale égale =  $\frac{9}{4}(t_2-t_1) = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{4} \times 50 = 0.05^{\circ}$ .

L'erreur est tolérable avec le degré de précision de la méthode visuelle.

Lors du retournement de l'objectif, cette bissectrice se transforme en une seconde droite, parallèle à la première et la moyenne des deux positions de la bissectrice passe, elle, rigoureusement par le zénith, autour duquel s'est effectué le retournement.

Le raisonnement est évidemment identique pour le second couple, et l'intersection des deux droites moyennes est précisément le zénith du lieu d'observation.

#### Remarque importante:

La détermination de l'azimut d'un fil, décrite précédemment, repose sur la connaissance des coordonnées des étoiles observées, par l'AGK2 dans le cas présent.

Une détermination absolue qui deviendra indispensable dans l'utilisation du TZP définitif, repose sur la présence, fondamentale, de 4 fils au minimum dont les distances d<sub>1</sub> et d<sub>2</sub> mesurées au microscope, le parallélisme étant contrôlé également au microscope. (fig. 43).

Dès les premières observations, la comparaison des intervalles de temps  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  aux distances  $d_1$  et  $d_2$  permet de calculer facilement l'azimut de chaque couple.

Ainsi la mesure au microscope doit permettre de déterminer

les caractéristiques intrinsèques du réticule lié à l'objectif tandis que le résultat des observations ajouté à ces paramètres intrinsèques permet de déterminer un paramètre extrinsèque, à savoir l'orientation, c'est-à-dire celle de l'objectif par rapport au méridien.

La mesure du réticule au laboratoire n'a pu être entièrement menée à bien car les fils d'araignée sont dans deux plans légèrement distincts. Elle ne posera pas de problème analogue dans le cas du réticule photogravé sur l'objectif et sera d'une utilité fondamentale dans l'utilisation du TZP pour des mesures absolues.

## Coordonnées à l'origine : détermination de l'erreur en longitude et en latitude.

Imaginons un instant que les fils moyens du réticule utilisé sont bien exécutés, c'est-à-dire exactement dans les azimuts +45° et -45°.

Si les o-c ne sont cependant pas nuls, seule une erreur de zénith peut l'expliquer, erreur due à l'introduction dans le calcul des c de latitude of et longitude L fausses, parce que mal commus.

Toute translation dans le plan du réticule, qui fait passer du zénith arbitraire au vrai zénith est décomposable en une translation de chaque fil moyen (c'est-à-dire de chaque couple), dans la direction du mouvement diurne et de module o-c,

Récimoquement, nous allons voir que la connaissance de o-c pour chaque fil moyen est directement lié à l'erreur de zénith et conduit à la connaissance de l'erreur  $\Delta$  en latitude et l'erreur  $\Delta$  en longitude.

Nous allons démontrer les deux relations qui permettent de calculer les corrections sur L et sur  $\phi$ . Ce sera désormais les corrections que nous appellerons  $\Delta \phi$  et  $\Delta L$ , à ajouter à  $\phi$  et L approchés pour en obtenir les valeurs plus exactes.

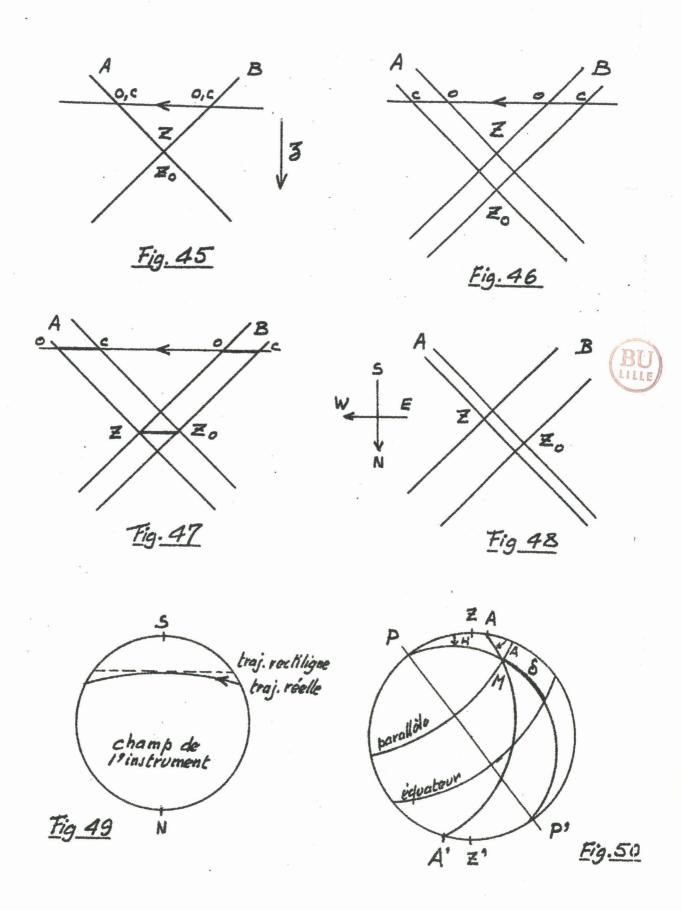
Soit Zo le zénith approché du lieu d'observation, connu actuellement par :

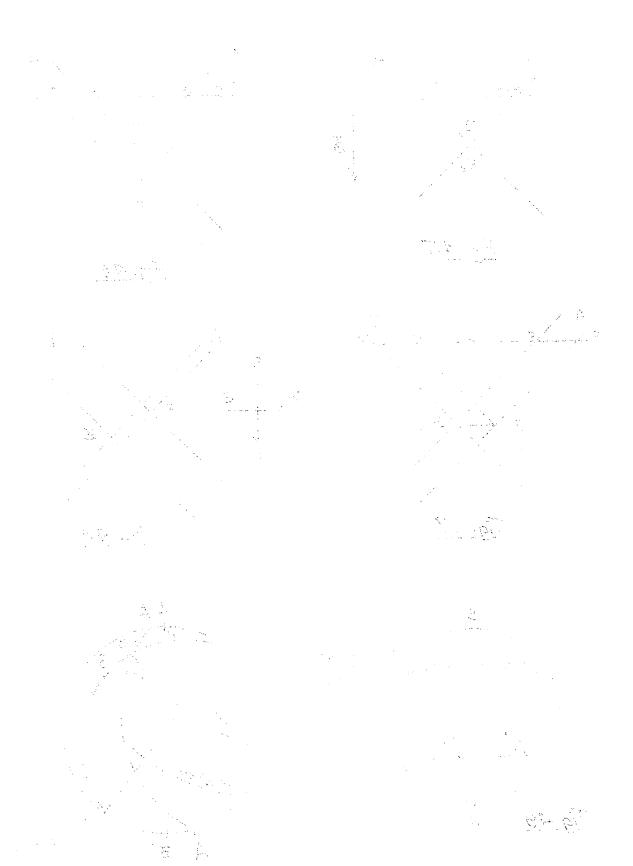
$$\Phi = 50^{\circ}36'57''$$
 L =  $12^{m}17^{s}$  Est

Soit Z le zénith vrai du lieu d'observation, dont les coordonnées vérifient:

$$\phi^{\dagger} = \dot{\phi} + \Delta \phi$$
$$L^{\dagger} = L + \Delta L$$

En Z se coupent les 2 fils moyens du réticule. Différents cas peuvent se présenter :





a) 
$$\Delta L = \Delta \Phi = 0$$
 (figure 45)

Les deux systèmes sont confondus (-o-c pour les 2 couples (voir fig. 45)

b) 
$$\Delta L = 0$$
,  $\Delta \Phi \neq 0$   $(\Delta \Phi = -\Delta z \operatorname{car} z = \delta - \Phi)$  (fig. 46).

Une translation de chaque couple fait apparaître des o-c de mêmes valeurs absolues mais de signes contraires.

$$(o-c)_A = \Delta A = -\Delta B = -(o-c)_B = \frac{\Delta \Phi}{\cos \Phi}$$

c)  $\Delta L \neq 0, \Delta \Phi = 0$  (fig.47)

Une translation de chaque couple fait apparaître cette fois des o-c de mêmes valeurs absolues et de mêmes signes :

$$(o-c)_{\Delta} = (o-c)_{R} = \Delta A = \Delta B = \Delta L$$

d) 
$$\Delta L \neq 0$$
 ,  $\Delta \Phi \neq 0$  (fig. 48)

Posons là encore  $\Delta A = (o-c)_A$  et  $\Delta B = (o-c)_{R}$ .

 $\Delta A$  est dû cette fois en partie au terme  $\Delta \phi / \cos \phi$  et en partie au terme  $\Delta L$ . Il en est de même pour  $\Delta B$ . On peut écrire, suivant une terminologie évidente

$$\begin{cases} \Delta A = \Delta A_{\Phi} + \Delta A_{L} \\ \Delta B = \Delta B_{\Phi} + \Delta B_{L} \end{cases}$$

Et d'après b et c

 $\Delta A_{\Phi} = -\Delta B_{\Phi}$  et  $\Delta A_{L} = \Delta B_{L}$ ; ces diverses composantes doivent être telles que si  $\Delta \Phi = 0$ :

$$\Delta A = \Delta B = \Delta A_L = \Delta B_L = \Delta L.$$

et si 
$$\Delta L = 0$$
,  $\Delta A = -\Delta B = \Delta A_{\Phi} = -\Delta B_{\Phi} = \frac{\Delta \Phi}{\cos \Phi}$ 

De sorte que finalement :

$$\begin{cases} \Delta A = \Delta \Phi / \cos \frac{\pi}{2} \Delta L \\ \Delta B = -\Delta \Phi / \cos \Phi + \Delta L \end{cases}$$

La résolution de ce système entraîne :

$$\Delta \Phi = \frac{\Delta A - \Delta B}{2} \cos \Phi$$

$$\Delta L = \frac{\Delta A + \Delta B}{2}$$

Dans l'hypothèse d'un fil moyen du réticule réel bien orienté par

rapport au méridien, il est évident que o-c relatif à un couple est le même en tout point du champ puiqu'il représente au coefficient  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  près la distance entre deux fils moyens parallèles.

Dans la réalité, il existe une erreur d'orientation du fil moyen pour chaque couple et une erreur de centrage. Comme nous l'avons vu dans l'interprétation du graphique III, ces deux défauts sont très bien discernables et même ils sont évalues quantitativement.

L'ordonnée à l'origine qui subsiste après les différentes corrections apportées au graphique n'est pas autre chose que le  $\Delta A$  pour la droite A (  $\Delta B$  pour la droite B) qui vient de servir au calcul de  $\Delta \Phi$  et  $\Delta L$ . Résultats numériques.

$$\Delta A = -0.8s$$

$$\Delta B = +2.0s$$
D'où  $\Delta L = 0.6s$ 

$$\Delta \Phi = -1.4s.0.6345 = -0.88 s = -13"2.$$

Les valeurs de AA et AB sont du même ordre de grandeur que la dispéssion (voir "moindres carrés"), par conséquent sont significatives. Mais ces valeurs, sont certainement aussi entachées d'une erreur systématique, l'équation personnelle, vraisemblablement du même ordre de grandeur.

Le but poursuivi n'étant nullement le perfectionnement de la méthode visuelle, nous n'avons pas cherché à éliminer cette erreur systématique. On ne peut donc pas conclure de correction sur les coordonnées  $\Phi$  et L du lieu d'observation.

# IV- Revision des approximations sur la forme de la trajectoire et sur la vitesse angulaire des étoiles.

Nous avons considéré dans le précédent calcul que les trajectoires étaient rectilignes (fig. 49) et que la vitesse angulaire était la même pour toute étoile du champ : ceci revient à dire que tous les calculs précédents relatifs aux instants calculés "c", présentent un caractère approché Nous voudrions dans la suite remplacer ce calcul approché par un calcul exact, nous réservant la possibilité de le simplifier, par un développement limité contenant plus ou moins de termes selon la précision désirée. Pour cela nous représente-

I the A. Milliam of programming the Village of the

rons le réticule et la trajectoire de manière exacte sur la sphère céleste, et raisonnerons sur cette sphère, de sorte que les deux approximations précédentes disparaîtront implicitement.

Un fil rectiligne est représenté sur la sphère céleste par un grand cercle caractérisé par d et A. d est la distance zénithale méridienne du point d'intersection A du fil avec le méridien. A est l'azimut de ce fil.

Soit II l'intersection du fil avec le parallèle de l'étoile (fig.50) Posons  $PA = PZ + ZA = \frac{\pi}{2} + d - \frac{1}{2}$ 

$$PM = \frac{\pi}{2} - 8$$

A est l'azimut du fil.

H est l'angle horaire de l'étoile lors du passage.

La formule des cotangentes appliquée au triangle PZI entraîne :

$$\sin \left(\frac{\pi}{2} - \Phi + d\right)$$
.  $tgd = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \Phi + d\right)$ .  $cos H = sinH.cotgA$ . soit  $cos (\Phi - d)$ .  $tgd = sin (\Phi - d)$ .  $cos H = sin H$ .  $cotgA$ .

Cette formule permettrait de calculer numériquement et rigoureusement l'angle horaire H de l'étoile lors du passage, c'est-à-dire finalement l'instant du passage, connaissant les coordonnées  $\phi$  et L du lieu d'observation et les constantes instrumentales A et d'de chaque fil.

Tirons-en un développement limité de H au 2ème ordre en z. Les instents des passages sur les fils vrais pouvant ensuite être déduits comme pricéderment par addition de #At à l'instant calculé pour le fil moyen, car d(z maximal; la formule précédente devient avec d = o:

cos otg tas = sin otg. cosH - sinH. cotg soit en développent jusqu'au 2 me ordre en H:

 $\frac{\text{H}_2}{2}\sin\widehat{\Phi} + \text{H cotgA} = \sin \Phi + \cos\widehat{\Phi} \cdot \text{tg6} = 0.$ 

Résolvons cette équation du second degré en H :  $\Delta = \cot g^2 A - 2 \sin \phi (\cos \phi \cdot tg \delta - \sin \phi).$ 

Effectuons la parenthèse, remplaçons tg8 par :

$$tg(z+\phi) = \frac{tgz + tg\phi}{1 - tgz \cdot tg\phi} = \frac{tgz + tg\phi}{1 - \epsilon} = (tgz + tg\phi)(1 + \epsilon^2).$$

Finalement:

$$\Delta = \cot^2 A - 2 z t_6 \Phi - 2 z^2 t_6^2 \Phi.$$

$$\Delta = \cot^2 A^{2} \left[ 1 - \left( \frac{2z \operatorname{tg} \Phi}{\cot^2 A} + 2z^2 \frac{\operatorname{tg}^2 \Phi}{\cot^2 A} \right) \right].$$

En remarquant que 
$$(1-\xi)^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{\xi}{2} - \frac{1}{8} \xi^2$$
, nous obtenons :

$$\Delta = \cot \alpha A \left[ 1 - z \frac{\tan \phi}{\cot \alpha^2 A} - z^2 \frac{\tan^2 \phi}{\cot \alpha^2 A} - \frac{1}{2} z^2 \frac{\tan^2 \phi}{\cot \alpha^2 A} \right]$$

$$d^{\dagger}ou H = \frac{-\cot g A^{\pm}\cot g A}{\cot g^{2}A} \left[1-z \frac{\cot g}{\cot g^{2}A} - z^{2} t g^{2} \phi \left(\frac{1}{\cot g^{2}A} + \frac{1}{2\cot g^{2}A}\right)\right]$$

Or, avec  $\Lambda = \frac{\pi}{4}$ , nous devons avoir H = o pour z =o; nous ne retiendrons donc que la plus grande des racines :

$$H = \frac{-z}{\cos \Phi \cdot \cot gA} - \overline{z}^2 \frac{\sin \Phi}{\cos^2 \Phi} \left( \frac{1}{\cot gA} + \frac{1}{2\cot g^3 A} \right).$$

$$H = \frac{-z}{\cos \Phi} + tgA - z^2 + \frac{\sin \Phi}{\cos^2 \Phi} (tgA + \frac{1}{2} tg^3A)$$

Cette formule vérifie bien que sur les fils du couple A d'azimut +45°, ce sont les étoiles de z>0 qui passent le plus vite.  $z>0 \Leftrightarrow \delta>\Phi$ .

Le terme principal est d'ailleurs identique au terme unique de la for mule qui avait permis précédemment de calculer les "c".

## Précision :

Le calcul que nous venons d'effectuer n'a pas essentiellement servi dans la réduction des observations visuelles sur lesquelles nous n'avons pas éliminé l'équation personnelle. Mais il sera indispensable dès que la méthode visuelle sera remplacée par la méthode photoélectrique.

A titre d'indication, remarquons que z prend une valeur maximum de  $12.5 = 3.62.10^{-3}$ rd.

Négliger le 2ème ordre en z revient à commettre une erreur de l'ordre de :  $(3,62)^2.10^{-6}$  :  $13,1.10^{-6}$  =  $2^{11}$ 7

Négliger le 3ème ordre en z revient à commettre une erreur de l'ordre de :  $(3.62)^3.10^{-9} = 47.5.10^{-9} = 0$ "Ol

Remarque: Nous venons de gravir un échelon en ce qui concerne la précision.

Lorsque le TZP permettra d'envisager une précision de l'ordre de 0,001 seconde de temps, il faudra reconsidérer ce développement limité de H en particulier ne plus négliger le 3ème ordre en z et développer aussi en fonction de d qui pourra atteindre des valeurs plus importantes dans le réticule sur verre.

#### V- Réduction au jour.

L'AGK2 fournit ∝ et δ relativement au point γ 1950,0 ; en outre, ce sont les coordonnées moyennes, c'est-à-dire non corrigées de l'aberration ni de la nutation.

Le catalogue "Apparent places of fondamental stars" donne les positions apparentes de 1585 étoiles fondamentales réparties sur toute la sphère céleste, à intervalles de 10 jours en 10 jours de sorte qu'il est possible d'interpoler pour une date quelconque. Mais il est évident qu'un très petit nombre de ces étoiles est compris dans l'intervalle 50°24' -50°50', si bien qu'il est indispensable de prévoir par un calcul approprié les corrections de la précession de l'aberration et de la nutation pour une étoile non fondamentale dont on ne connaît que les coordonnées 1950,0. C'est cet ensemble de corrections que l'on appelle réduction au jour.

La "Connaissance des Temps" donne deux formules pour la réduction au jour. L'une est commode pour la réduction isolée d'une étoile. La seconde, celle que nous avons choisie, est plus appropriée à la réduction d'un grand nombre d'étoiles. Cette formule est largement expliquée dans la "Connaissance des Temps". Nous pouvons dire que la correction à apporter à une coordonnée 1966,0 pour avoir la coordonnée à la date d'observation est le produit scalaire d'un vecteur ne dépendant que de l'étoile par un vecteur ne dépendant que de la date ; par exemple Δα = Aa + Bb + Cc ...

La précession de 1950,0 à 1966,0 (ou au commencement de l'année en cours) est corrigée indépendamment de la réduction proprement dite.

Le calcul a été programmé de telle sorte que chaque constante est exprimée, selon sa nature, soit en fonction de la date d'observation, soit en fonction des données du catalogue, relatives à l'étoile.

Le programme est enregistré sur cartes perforées. Il en est de même pour les caractéristiques de l'étoile :  $\alpha$  et  $\delta$  de 1950,0,  $\Delta_1^{\alpha}$   $\Delta_1^{\delta}$  (termes du ler ordre),  $\Delta_2^{\alpha}$  et  $\Delta_2^{\delta}$  (termes du 2ème ordre) exprimés en " ou en s. par siècle, sont perforées à raison d'une carte par étoile.

Il suffit alors d'introduire dans le programme la date d'observation (jour, mois, année) : la calculatrice fournit alors la position apparente de l'étoile dont on a introduit la carte correspondante (fig. 51).

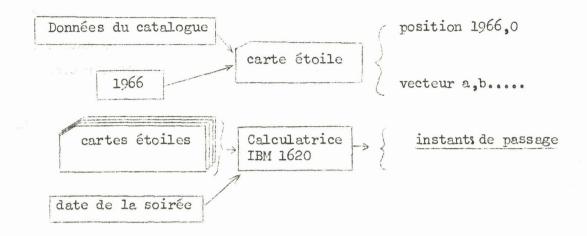


Fig. 51

VI- Méthodes des moindres carrés; évaluation de la dispersion.

# a) Moindres carrés (5)

Nous avons représenté au \$III les résultats de l'observation par la fonction "o-c" = f(z).

Il est aisé, à partir du dernier tableau du paragraphe III de porter sur un système d'axes munis des unités appropriées, des points d'abcisse la distance zénithale et d'ordonnées "o-c".

Adoptons les notations suivantes qui nous sont familières :

$$x = z$$
 et  $y = "o-c"$ 

Puisque l'ensemble des points doit être convenablement représenté par une droite, soit y = ax+b l'équation de cette droite. Le problème de trouver la droite optimale revient à calculer les inconnues a et b : a n'est pas autre chose que la pente dont nous avons précisé la signification au paragraphe III, tandis que b est l'ordonnée à l'origine dont il a été largement question dans ce même paragraphe.

Soit  $x_i$ ,  $y_i$  les coordonnées d'un point déduit des observations. Dans le cas idéal, il doit vérifier :  $y_i = ax_i + b$ .

Si N est le nombre de points portés sur le graphique, les coordonnées de ces N points devraient au mieux vérifier les N équations :

$$ax_1 + b = y_1$$
$$ax_2 + b = y_2$$

$$ax_i + b = y_i$$

Les coefficients de ces N équations aux 2 inconnues a et b définissent une matrice à N lignes et 3 colonnes :

$$M = \begin{pmatrix} x_1 & 1 & y_1 \\ x_2 & 1 & y_2 \\ & & \\ x_i & 1 & y_i \\ & & \end{pmatrix}$$

Le produit de M par la matrice transposée donnerait immédiatement les coefficients de deux équations aux inconnues a et b :

a 
$$\Sigma x_i^2 + b\Sigma x_i = \Sigma x_i y_i$$
  
a  $\Sigma x_i + Nb = \Sigma y_i$ 

Cette opération répétée pour les 4 droites fournira les valeurs de a et b pour chacune des 4 droites, par l'intermédiaire de 4 matrices au total.

Nous n'effectuerons pas ce calcul qui ne tient pas compte du retournement de l'objectif rigoureusement égal à 180°. Nous mettrons à profit le fait que les 4 droites sont parallèles 2 à 2 en représentant l'ensemble des points relatifs à 2 droites parallèles par une seule matrice M' représentative de deux familles d'équations :

$$ax_i + b = y_i$$
  
 $ax_j + c = y_j$ 

dans laquelle i varie de l à k s'il existe k points expérimentaux relativement à la lère droite, j varie de k+l à n s'il existe m = n- k points expérimentaux relativement à la seconde droite, soit n points pour l'ensemble des deux droites de même pente a, d'ordonnées à l'origine respectivement b et c.

$$M' = \begin{pmatrix} x_1 & 1 & 0 & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & 1 & 0 & y_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_k & 1 & 0 & y_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{k+1} & 0 & 1 & y_{k+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_j & 0 & 1 & y_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & 0 & 1 & y_n \end{pmatrix}$$

Le produit de M' par la matrice transposée donne la matrice carrée à 4 lignes et 4 colonnes

Cette matrice fournit les coefficients d'un système de 3 équations dont les 3 inconnues sont a, b et c :

$$a \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} + b \sum_{i=1}^{k} x_{i} + c \sum_{i+1}^{n} x_{j} = \sum_{i=1}^{n} x_{i}y_{i}$$

$$a \sum_{i=1}^{k} x_{i} + b k = \sum_{i=1}^{k} y_{i}$$

$$a \sum_{i=1}^{n} x_{j}$$

$$+ c m = \sum_{i=1}^{n} y_{i}$$

L'ensemble des observations faites les 25, 26 et 28 avril donne pour le couple  $\Lambda$  :

On trouversit pour le couple P :

$$a = -0.56$$
 $b = 15.1$ 
 $c = -11.1$ 

b) <u>Dispersion:</u>Pour un point isolé de coordonnées expérimentales x et y; l'écart avec la droite représentative de l'ensemble des points est, en ordonnée,

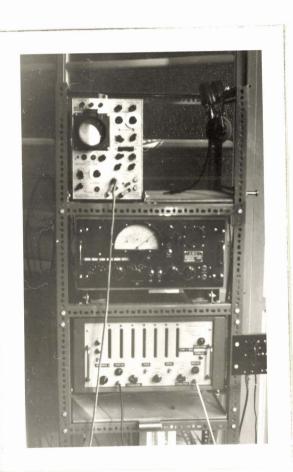
$$\Delta y_i = y_i - (\alpha x_i + b)$$

L'erreur quadratique moyenne, ou <u>dispersion</u>, est, pour l'ensemble aux points relatifs aux deux <u>droites parallèles</u>:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{n}{2} \Delta y_i^2 \\ \frac{1}{N-3} \end{cases}$$

Cette relation est applicable au précédent calcul qui consistait à déterminer les 3 inconnues a, b et c capables de définir 2 droites parallèles.

Le calcul à partir des valeurs expérienntales déjà utilisées montre, que pour l'ensemble de toutes les observations faites :



#### Charitre VI

QUELQUES IDEES sur l'ADAPTATION de la METHODE PHOTOELECTRIQUE.

# I- Les possibilités de la cellule.

Le matériel utilisé pour cette étude comprend:

- un photomultiplicateur RCA, 931 A, à 10 étages (ou dynodes accélératrices). Des précisions sont données à la fin du paragraphe.
- une source de tension continue et très stable, allant de 0 à 3000 volts par valeurs discontinues et suffisamment rapprochées (environ de 20 en 20 volts).
- un oscilloscope cathodique à 2 voies, d'impédance d'entrée en continu égal à 1 M $\Omega$ La sensibilité maximale est l'IV. par mm, soit en intensité  $\frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 10^{-9} \text{ N/mm}.$

Dans les conditions de température normale, les électrons émis à la cathode par effet photoélectrique créent un courant de 30%A/lumen, avec une lampe à filament de tungstene porté à 2600° C. Le facteur d'amplification est 800 000 dans les conditions normales de fonctionnement (soit avec 1000 V. aux bornes du potentiomètre), figure 52. C'est donc finalement avec une sensibilité de 24 A/lumen que le courant photoélectrique apparaît à l'anode du photomultiplicateur.

Calculons le flux lumineux capable de fournir une déviation du spot de 5mm, c'est-à-dire bien visible à l'oscilloscope.

Sur la sensibilité maximale, 5mm représentent 5mV aux bornes d'une résistance de 1852, soit finalement un courant photoélectrique :

$$i = \frac{5.10^{-3}}{10^6} = 5.10^{-9} A.$$

dû à un flux lumineux de  $\frac{5.10^{-9}}{24}$  = 0,2.10<sup>-9</sup> lumen.

La surface utile de l'objectif est 60 cm environ, déduction faite de la surface cachée par le prisme et son dispositif de fixation.

Un tel flux de 0,2.10<sup>-9</sup> lunen à travers l'objectif provient d'une étoile dont l'éclat est :

$$\frac{0.2.10^{-9}}{60.10^{-4}} = 0.34.10^{-7} \text{ lux.}$$

ou encore :

$$\frac{0.34 \cdot 10^{-7}}{2.10^{-6}} = 0.17 \cdot 10^{-1}$$
 unité astronomique d'éclat.

Compte tenu des pertes de lumière dans l'atmosphère, et par les diverses réfractions ou réflexions dans l'instrument, on peut espérer obtenir le résultat escompté avec une étoile d'éclat :

$$e = 2 \times 0.17.10^{-1} = 0.34.10^{-1}$$

c'est-à-dire de magnitude m telle que :

$$m = -2,5 \log e = -2,5 (\log 0,34-1) = 3,7.$$

La sensibilité spectrale de la cellule est maximum entre 3500 et 4500 Å. La déviation du spot est donc d'autant plus marquée pour une magnitude visuelle donnée que l'étoile est plus chaude ou plus bleue.

Les étoiles zénithales sont imposées, mais la remarque précédente a été mise à profit lors des essais de la cellule sur le télescope zénithal par l'intermédiaire du sidérostat. Cet instrument, muni d'un miroir plan animé par un mécanisme d'horlogerie approprié, permet de choisir dans une vaste partie du ciel nocturne, une étoile bleue et brillante, et d'envoyer le faisceau de lumière qui en provient sur un 2ème miroir qui forme une image virtuelle de l'étoile au-dessus du TZP, à la verticale de celui-ci. On dispose donc du moyen d'observer au TZP une étoile fort éloignée du zénith.

La figure 52 représente schématiquement la cellule RCA, 931 A. Les traits pointillés rappellent les grilles accélératrices d'une cellule Lallemand. En fait, ici, les grilles sont remplacées par des plaques portées à un certain potentiel, les dynodes, qui

qui réfléchissent les électrons incidents en leur ajoutant ceux de l'émission secondaire. Chaque dynode a un potentiel supérieur à la précédente de 100 volts environ.

#### II - Le bruit de fond

La cellule travaille le plus souvent au voisinage de la limite de ses possibilités puisque les étoiles zénithales de magnitude inférieure à 3,7 sont rares. Le courant d'anode est, de ce fait très faible.

Ouoi qu'il en soit, nous nous efforcerons toujours d'améliorer le rapport signal/bruit, de sorte que le signal résultant de l'occultation d'une étoile soit le plus facilement discernable parmi les signaux parasites, et repérable avec précision dans le temps.

Nous allons montrer d'une part que la résistance d'entrée R de l'oscilloscope doit être choisie assez grande pour rendre négligeable au mieux qu'il est possible le bruit thermique créé dans R, d'autre part que si le courant photoélectrique proprement dit s'abaisse en intensité jusqu'à l'ordre de grandeur du courant d'obscurité, la cellule doit être refroidie pour réduire l'effet de granaille (effet Schottky) dû au caractère discret du courant d'électrons.

Soit i, le courant photoélectrique, io le courant d'obscurité. Soit i = i - io.

Soit K le facteur d'amplification de la cellule, Ki = I le courant à la sortie du multiplicateur, c'est-à-dire à l'anode. Le signal utile est  $\mathbb{R} I = K \text{ Ri}_p \text{ , qui est équivalent à RI lorsque } i_0 \leqslant i \text{ .}$ 

1) L'agitation thermique des électrons dans R crée une tension de bruit dont le carré moyen vaut:

$$\overline{(\Delta V_2)^2} = 4 RkT\Delta v \tag{6}$$

k = constante de Boltzmann.

T = température Kelvin

Δν = intervalle des fréquences considéré.

Le rapport signal/bruit qui vaut :

$$\frac{RI}{\left(\Delta V_{2}\right)^{2}} = \frac{RI}{\sqrt{4 RK\Delta V}} \sqrt{R},$$

est d'autent meilleur, c'est-à-dire plus grand que R est grand.

2) On montre dans le cas d'une cellule simple (sans multiplicateur) que le bruit dû à l'effet de grenaille a pour carré moyen entre les fréquences v et <u>v+ ∆</u>v :

 $(\Lambda i)^2 = 2 ei \Lambda v$ 

La tension de bruit correspondante a pour carré moyen :

$$\frac{\overline{2}}{(\Delta V_1)} = 2ei R^2 \Delta v.$$

Le rapport en intensités, bruit/signal, est égal à

$$\frac{\sqrt{\left(\Delta i\right)^{2}}}{i} = \sqrt{\frac{2 \text{ ei}\Delta v}{i}} = \sqrt{\frac{2 \text{ e}\Delta v}{i}}, \text{ ce qui est en général négligeable.}$$
Dans le cas d'une cellule à multiplicateur,  $\frac{\left(\Delta I\right)^{2}}{I}$  est encore égal à  $\frac{2e \Delta v}{i}$  soit en remplaçant i par  $I/K$ ,  $\frac{\left(\Delta I\right)^{2}}{I} = \sqrt{\frac{2eK\Delta v}{I}} = \sqrt{\frac{2eK\Delta v}{I}}$ .

Egal à 
$$\sqrt{\frac{2e \Delta v}{i}}$$
 soit en remplaçant i par I/K,  $\sqrt{\frac{(\Delta I)^2}{I}} = \sqrt{\frac{2eK\Delta v}{I}} = \sqrt{\frac{2eK\Delta v}{I}}$ .

Le rapport en tensions signal/bruit est clors égal à

$$\frac{RI}{R\sqrt{(\Delta I)^2}} = \frac{I}{\sqrt{(\Delta I)^2}} = \frac{I}{\sqrt{2eIK\Delta\nu}}, \text{ il est indépendant de R, mais le bruit n'est plus négligeable.}$$

Le bruit thermique est égal au bruit Schottky si :

$$R^{2}(\Lambda I)^{2} = 4 RkT\Delta v = 2R^{2}eI K\Delta v$$

$$R = 2 \frac{kT}{eIK}$$

ovec  $T = 300^{\circ}K$ ,  $I = 5.10^{-9}A$ ., et K = 800 000.

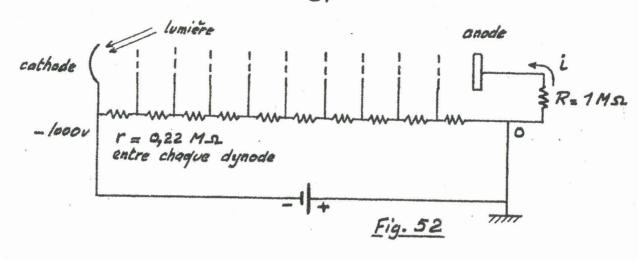
$$R = 16\Omega$$
.

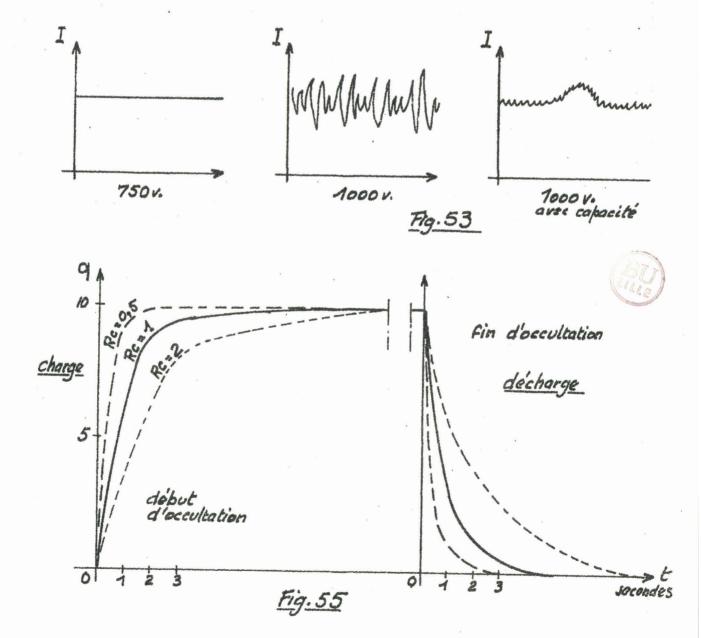
Le bruit thermique sera négligeable devant l'effet de grenaille si on prend R >16Ω, ce qui est largement réalisé avec la résistance d'entrée de l'oscilloscope égale à  $10^6 \Omega$  .

3) Dans le cas où le courant photoélectrique proprement dit, soit I , est de l'ordre de grandeur du courant d'obscurité, soit Io, la vraie valeur du rapport signal/bruit est

$$\frac{\text{RI}_{p}}{\text{R}\sqrt{2e\text{K}\Delta\nu}\,\,\sqrt{\text{I}_{p}\,+\,\text{I}_{o}}}$$

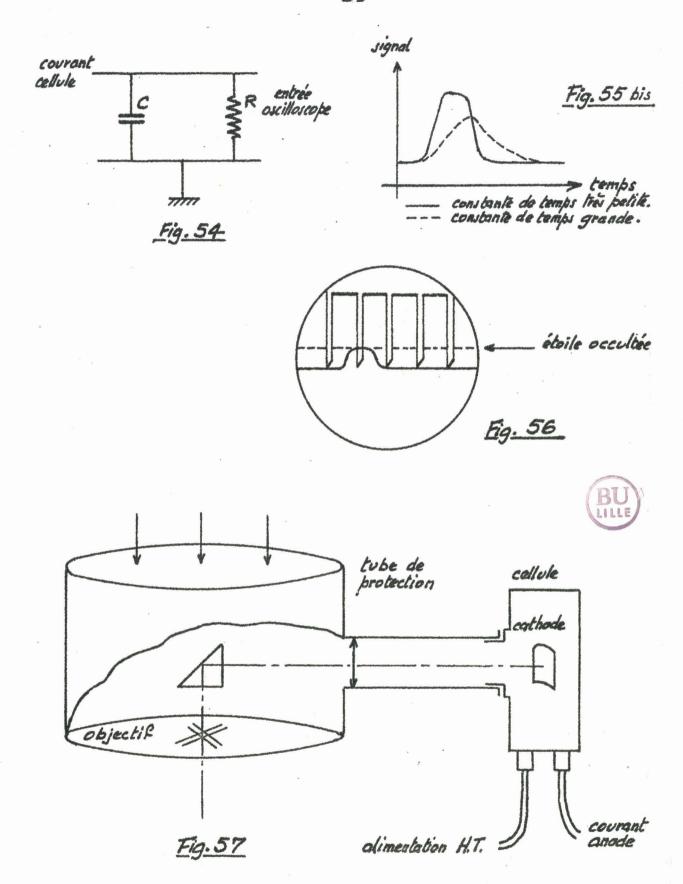
Si  $I_{\rho} \ll I_{o}$ , signal/bruit  $\#\frac{I_{\rho}}{\sqrt{2eI_{\rho}K\Delta\nu}} \sim I_{\rho}$ , et ce rapport diminue très vite,

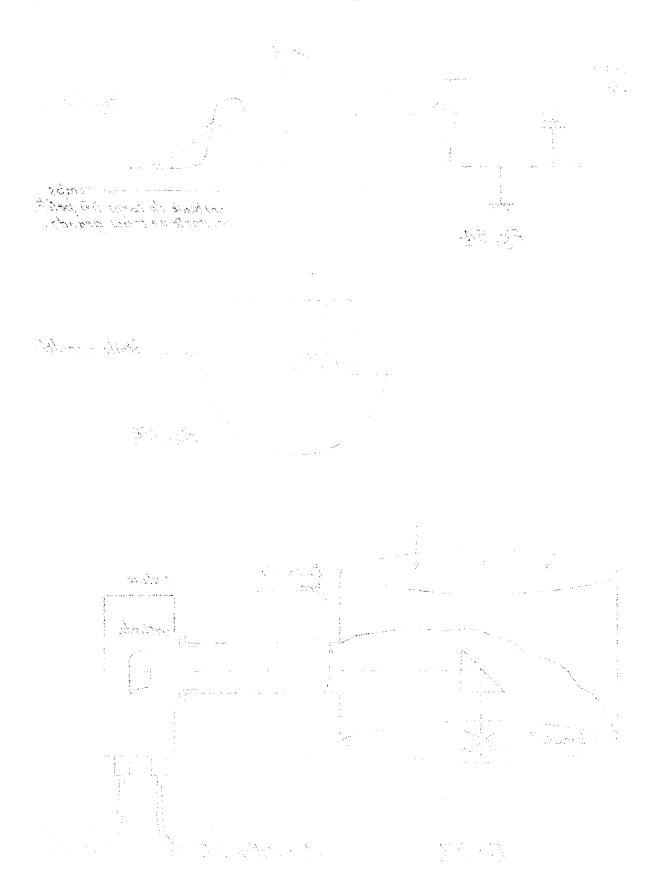




i en 17 En 1450. Ostore - Austreas Aggres

Pic checulation





si bien qu'il est pratiquement impossible de descendre becucoup au-dessous de  $I_{\rho} = I_{o}$ . Il reste alors la solution d'abaisser  $I_{o}$  à son minimum pour enéliorer les performances de la cellule, et ceci n'est possible que par refroidissement de la cellule.

4) Lorsque le signal électrique provenant du passage de l'étoile sur un fil est trop faible pour être visible sur le spot de l'oscilloscope' (fig.53 à gauche), il est tout naturel d'aug enter la multiplication en accroissant la tension aux bornes des dynodes accélératrices. C'est alors que le bruit de fond peut masquer le signal (fig. 53 au milieu).

Il est possible d'éliminer les fluctuations, tout en conservant inchangée la composante continue due au courant photoélectrique (fig.53 à droite). c'est de court-circuiter l'entrée de l'oscilloscope par une capacité qui absorbe la composante variable. Plus rigoureusement elle réduit la bande passante  $\Delta v$  (Fig.54).

Ce dispositif a l'inconvénient qu'il tend aussi à amortir le signal variable dû à la variation de flux lors de l'occultation de l'étoile par un fil.

Ceci rend moins précis la lecture de l'instant de passage correspondant. La figure 55 montre l'allure de la courbe  $\Delta v = f(t)$  aux bornes de la capacité, variation de tension due à la variation du flux lumineux.

La forme des courbes de la figure 55 suppose que l'étoile disparaît et réapparaît instantanément lors de l'occultation par un fil. Dans la réalité les points anguleux seront remplacés par des arrondis (par suite de la diffraction, de l'agitation etc...). Ceci serait également valable dans le cas où il ne serait pas intruduit de capacité (RC = o).

De plus, il est bien évident que les courbes réclles sont beaucour moins régulières que celles de la figure où le bruit de fond est absent. Dans le cas du réticule à traits multiples, la constante de temps devra être suffisement réduite (1 milliseconde serait une valeur maximale) pour que le . signal idéal soit peu déformé (fig.55bis) tandis que la multiplicité des passages doit permettre d'accroître la précision du repérage dans le temps. L'intégration permet d'être moins exigênt sur le rapport signal/bruit puisque 1'effet de l'intégration sera précisément d'améliorer ce rapport.

La figure 56 représente l'écran à fluorescence persistante de

l'oscilloscope; une des voies correspond au courant d'anode lors du passage de l'image stellaire sur un fil du réticule.

La seconde voie est reliée aux tops de secondes de l'horloge à quartz.

#### III- Quelques résultats expérimentaux.

L'oculaire utilisé pour les observations visuelles est remplacé par un tube de même diamètre; ce tube est soigneusement fermé à une extrémité par la cellule photoélectrique; à son intérieur il comporte une lentille; le cercle oculaire se forme sur la cathode de la cellule (fig.57).

L'intérieur du tube est noirci ainsi que l'entrée de la cellule, le dispositif de fixation du prisme et le voisinage du bain de mercure.

Un tube noirci surmonte l'objectif pour éviter l'incidence de la lumière parasite latérale.

Pour les essais, le TZP n'a pas été mis en position de fonctionnement normal sur son socle car le passage d'étoiles zénithales brillantes est trop rare et trop bref. Il a donc été installé dans la coupole pour observer les images zénithales, données par le sidérostat, d'étoiles quelconques.

Le courant anode est injecté dans la résistance d'entrée de l'oscilloscope. Il résulte une différence de potentiel aux bornes des plaques horizontales.

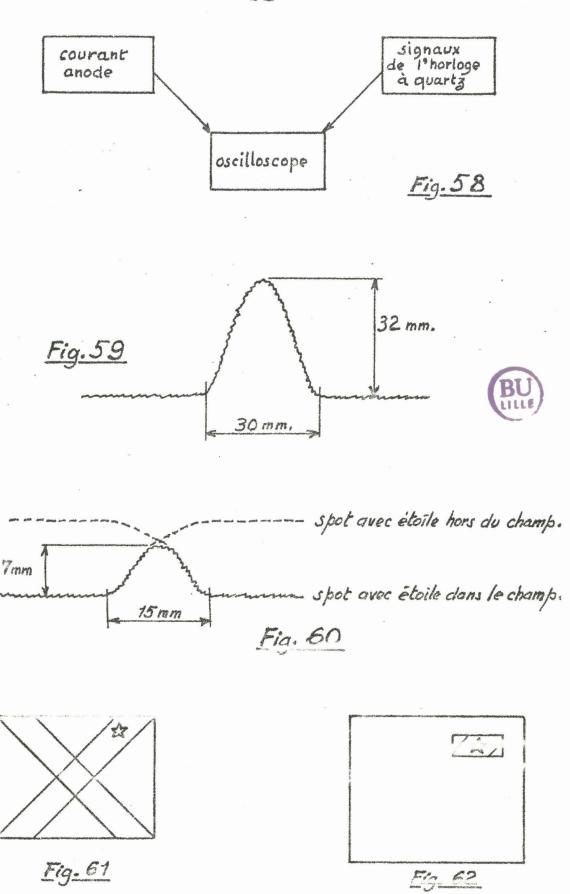
Le gain est maximum. Le balayage horizontal est réglé au minimum, le cm. par seconde (fig.58).

Le réticule dont les fils sont trop fins pour la mêthode photoélectrique est remplacé par un réticule en fil métallique de 0,1 ou 0,2mm de diamètre.

L'entrée de l'oscilloscope est shuntée par une capacité de 0,2 microfered.

Les résultats obtenus furent les suivants : Soirée du 28 juin 1966

1) Observation d'Arcturus ou « Rootes (m = 0,2; type spectral KO) fil de 0,2mm de diemètre.



en de la companya de la co

Appendix to the second second

Avec 100 volts aux bornes de multiplicateur, l'occultation de l'étoile par le fil se manifeste par une déviation du spot à peu près symétrique de 32mm de hauteur et 30mm de longueur, c'est-à-dire d'une durée de 3 secondes (fig.59).

Arcturus est une étoile jaune. Or la cellule a une sensibilité maximum au voisinage de 4000Å. Il était donc intéressant d'amener dans le champ du TTP une étoile plus faible mais plus proche du bleu :

2) Observation de «Corona Borealis. (m = 2,3; type spectral AO) fil de O,lmm de diamètre.

Avec 1000 volts aux bornes du multiplicateur.

L'occultation n'est pas parfaite. Mais sa durée n'est plus que de 1,5 seconde, tandis que le spot dévie de 7mm (fig. 60).

Note: D'après les calculs faits pour m = 3,7, c'est une déviation de 16,5 mm que le spot aurait dû marquer. La différence se justifie assez bien quantitativement par le fait que l'occultation n'est pas totale derrière un fil de 0,1mm de diamètre, d'autant plus que les deux réflexions supplémentaires sur les miroirs assez médiocres du sidérostat, introduisent des aberrations géométriques sensibles.

## 3) Effet d'un cache.

Dans l'expérience précédente, le champ n'est limité que par le contour du prisme (fig. 61), c'est-à-dire que toute la lumière provenant du fond du ciel (étoiles parasites, nébulosités, brume...) atteint la cellule, et cette lumière parasite dans le champ du TZP a une magnitude non négligeable.

En effet, sur l'attenuation 10 de l'oscilloscope, l'introduction d'un cache qui ne laisse apparaître que l'étoile et la partie utile du réticule (fig.62) devie le spot de 10mm., ce qui correspond à un courant photoélectrique important. Or nous savons que le bruit de fond croît avec le courant photoélectrique, le rapport signal/bruit de fond est donc d'autant plus mauvais que cette lumière parasite du fond du ciel n'est pas éliminée.

#### IV - Conclusion:

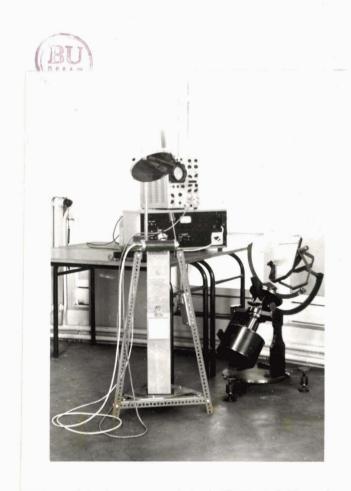
De cette brêve experimentation du TZP photoélectrique nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- dans le fonctionnement direct du TZP, sans sidérostat, l'image stellaire est sûrement meilleure, d'où la possibilité d'utiliser des traits plus fins et ainsi d'avoir des occultations rapides et nettes. - Il s'avère indispensable de prévoir dans le TZP définitif, un diaphragme mobile qui suivra l'étoile dans son mouvement, ne laissant protiquement plus passer que la lumière utile, éliminant la magnitude du fond du ciel.

Ce diaphragme sera placé dans un plan image intermédiaire créé par un système de lentilles approprié.

Ainsi son mécanisme sera suffisemment éloigné du plan du réticule pour laisser à l'objectif la simplicité de son retournement.

- Enfin la cellule 931 A sera remplacée par une cellule Lallemand à 18 étages équipée d'un système de refroidissement. Cette cellule qui convient tout spécialement aux usages astronomiques possède des performances largement supérieures.



#### BIBLIOGRAPHIE

- (1) "The photographic zenith tube" par W. Markowitz dans "Telescopes" (p.83) ed. par Kuiper et Middlehurst (The University of Chicago Press)
- (2) Pierre Bacchus : Journée d'Astrométrie de Bordeaux (octobre 1965)
- (3) Erik Høg: "A Photoelectric meridian circle"

  Astronomische Abhandlungen der Hamburger Sternwarte BandV, N°8

  (Hambourg-Bergedorf 1960)
- (4) Danjon et Couder : "Lunettes et Télescopes"
- (5) Astrophysique générale par Pecker et Schatzman (Ed. Masson)
- (6) Electricité par Y. Rocard (Ed. Masson).

