

L'ASTROLABE IMPERSONNEL DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS

Par M. André DANJON.

SOMMAIRE. — Étude critique de l'astrolabe à prisme de Claude et Driencourt. Pour l'améliorer, il faut le rendre impersonnel et superposer les deux pupilles de sortie. On y parvient en adaptant à l'appareil un micromètre polarisant à double image. Description, mode d'emploi, réglage de l'astrolabe impersonnel de 6 cm d'ouverture. Un appareil perfectionné de 10 cm d'ouverture est en construction.

ABSTRACT. — Critical study of Claude and Driencourt's Prism astrolabe. To improve it, we have to make it impersonal and to manage so that the two exit-pupils will be overlying. This result is obtained by adding a polarising double-image micrometer. Description. Directions for use. Adjustment of the 6 cm aperture impersonal astrolabe. An improved instrument of 10 cm aperture is under construction.

ZUSAMMENFASSUNG. — Untersuchung und Beurteilung des Prismen-Astrolabiums von Claude und Driencourt. Um es zu verbessern muss es unpersönlich gemacht werden und die Austrittspupillen müssen in Übereinstimmung gebracht werden. Dies wird ermöglicht durch die Anwendung eines Doppelbild-Polarisationsmikrometers. Beschreibung, Gebrauchsanweisung, Justierung des unpersönlichen Astrolabiums von 6 cm Öffnung. Der Bau eines verbesserten Instrumentes von 10 cm Öffnung ist im Gang.

Резюме. — Автор критически изучает призмную астролябию Клода и Дриенкура. Чтобы ее улучшить, нужно приспособить регистрирующий микрометр и добиться слияния выходных зрачков. Эта двойная цель достигается применением поляризующего микрометра раздваивающего изображения. Описание, способ наблюдения и установка регистрирующей астролябии с объективом в 6 см. Новый усовершенствованный инструмент (10 см диаметром) находится в постройке.

L'instrument qui fait l'objet du présent Mémoire est destiné à la détermination du temps et de la latitude par la méthode des hauteurs égales généralisée. C'est un perfectionnement de l'astrolabe à prisme de Claude et Driencourt, dont nous allons rappeler le principe ⁽¹⁾.

L'astrolabe de Claude et Driencourt. — Une lunette horizontale mobile en azimut est précédée d'un prisme de verre équilatéral, dont les arêtes sont horizontales, et la face de sortie verticale (*fig. 1*). En avant

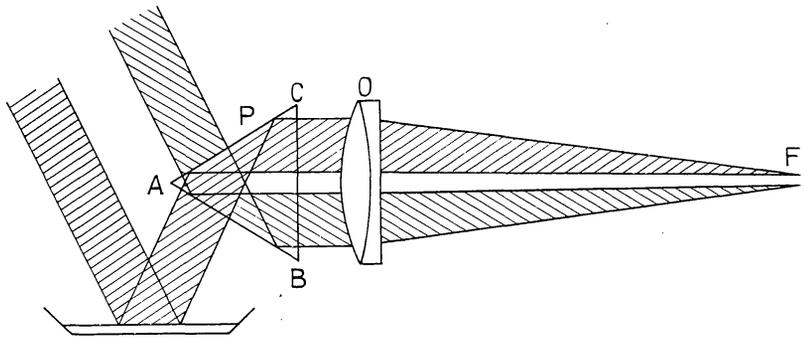


Fig. 1. — Marche des rayons dans l'astrolabe à prisme de Claude et Driencourt.

et au-dessous du prisme, est disposé un bain de mercure. La lumière provenant d'une étoile peut pénétrer dans la lunette : 1^o, par une réflexion interne sur la face AB du prisme; 2^o, par une réflexion interne sur la face AC, précédée d'une réflexion sur le bain de mercure. Il se forme donc deux images de l'étoile dans le champ de la lunette; ces images sont situées sur une même verticale, l'une d'elles descendant tandis que l'autre monte. Elles se superposent à l'instant où la distance zénithale apparente de l'étoile est exactement de 30°. La latitude du lieu et la correction de la pendule peuvent se déduire des temps enregistrés au passage de plusieurs étoiles par cette distance zénithale; il en faut au moins trois, dans des azimuts différents.

Sans parler ici des avantages bien connus de la méthodes des hauteurs égales, rappelons les qualités du système constitué par l'association d'un bain de mercure et d'un prisme équilatéral.

a. Avec un tel système, la verticale est définie optiquement, grâce à la réflexion sur le mercure. La direction du zénith est donc déterminée avec la même précision que celle de l'étoile, ce qui n'a pas lieu en général lorsqu'on utilise un niveau. D'autre part, la fidélité d'un bain de mercure *correctement réalisé* est beaucoup plus grande que celle d'un niveau.

⁽¹⁾ *La méthode des hauteurs égales en astronomie de position* (Rev. gén. Sc., 1905, p. 972); *L'instrument des hauteurs égales en astronomie de position* (Id., p. 1071); *Description et usage de l'astrolabe à prisme*, 1 vol., Gauthier-Villars, Paris, 1910.

b. La distance zénithale apparente est déterminée par l'angle du prisme, lequel est beaucoup plus stable que ne le sont les constantes d'un instrument des passages. Je m'en suis assuré en soumettant, au cours des vingt dernières années, plusieurs prismes de très bonne qualité optique à des contrôles répétés. Lorsque le prisme est isotherme, son angle est défini, soit au cours d'une journée, soit au cours des années, avec des variations au plus égales aux erreurs d'observation, c'est-à-dire à quelques centièmes de seconde. Or, divers observateurs qui ont utilisé l'astrolabe à prisme de Claude et Driencourt ont signalé des variations de la distance zénithale atteignant plusieurs dixièmes de seconde, parfois même plusieurs secondes. La contradiction n'est qu'apparente. Ainsi qu'on le montrera plus loin, ces variations de la distance zénithale ne sont pas dues à des variations de l'angle du prisme, mais à un défaut du système optique adopté par Claude et Driencourt.

c. La valeur d'un instrument de mesure dépend avant tout de l'approximation avec laquelle doivent être satisfaites les conditions géométriques impliquées par le principe de cet appareil. En d'autres termes, *il faut s'assurer que ni les défauts d'exécution des parties mécaniques ou optiques, ni l'imperfection des organes de réglage et de contrôle ne compromettent la validité de ce principe.*

Les effets d'un défaut d'orientation du prisme ont été soigneusement étudiés par Claude et Driencourt. Si, d'autre part, l'angle du prisme diffère un peu de 60° , il ne peut en résulter qu'un changement de la distance zénithale, indépendant de l'étoile observée, ce qui n'a d'autre inconvénient que d'obliger le calculateur à considérer la distance zénithale comme une inconnue auxiliaire.

Un déplacement par translation, soit du prisme, soit du bain de mercure ne peut avoir aucun effet nuisible sur les observations, puisque les surfaces réfléchissantes sont disposées sur le trajet de faisceaux parallèles.

Si parfaite soit-elle, la surface d'un miroir n'est jamais assimilable à un plan au sens géométrique du mot. Elle introduit nécessairement des aberrations dans le faisceau réfléchi et dans l'image correspondante. Comme ces aberrations varient avec l'angle d'incidence (ce qu'oublient les auteurs qui constituent un instrument des passages avec une lunette fixe précédée d'un miroir mobile), l'image physique de l'étoile n'obéit pas, en général, aux lois dites des miroirs plans. Mais, dans l'astrolabe à prisme, les angles d'incidence restent invariables, l'orientation des faces du prisme étant l'objet d'un contrôle rigoureux. Les aberrations résiduelles introduites par le prisme et l'objectif affectent donc de la même manière les distances zénithales de toutes les étoiles observées.

Il faut rappeler, cependant, que cela ne suffit pas pour que les pointés soient faits sur ces étoiles dans des conditions rigoureusement identiques :

en effet, si les images sont entachées d'un résidu de coma accidentelle même faible, le caractère dissymétrique de cette aberration peut faire apparaître une équation de magnitude. L'optique de l'astrolabe devra donc être sévèrement contrôlée sur ce point, mais la même recommandation vaut pour tout instrument astronomique de mesure, *quel qu'il soit* ⁽²⁾.

Telles sont, à cette réserve près, les raisons pour lesquelles le système prisme-bain de mercure répond bien, *a priori*, aux exigences des observations de haute précision. Il reste à discuter l'emploi qu'en ont fait Claude et Driencourt. Dans leur pensée, l'astrolabe devait rester un appareil de campagne, transportable et aussi simple que possible. Je tiens de Driencourt lui-même qu'à son avis, l'astrolabe S. O. M. grand modèle (dont l'unique exemplaire a disparu au cours de la dernière guerre), complété par un appareil pour la mesure des équations personnelles absolues, ne laissait plus rien à désirer ⁽³⁾. Cependant, sans méconnaître la

⁽²⁾ A. DANJON, *Étude de deux instruments des passages; Notes sur le rôle des flexions et de la coma* (Bull. Astron., t. 13, 1947, p. 3. Voir les conclusions, p. 17).

⁽³⁾ Voici les principaux passages d'une lettre de Driencourt, datée du 17 novembre 1933, qui résume l'histoire de l'astrolabe de Claude et Driencourt :

« Pour avoir tout à fait le début, il faut remonter à janvier 1900, époque à laquelle Claude a publié une Note dans le *Bulletin Astronomique* intitulée : *Sur l'emploi d'un prisme à réflexion dans les lunettes*. L'appareil décrit dans cette Note était tout à fait rudimentaire : pas de système de réglage du prisme, bain de mercure indépendant. Il fallait toute l'astuce et la patience de Claude pour amener le prisme à avoir ses arêtes normales à l'axe optique et à l'axe vertical, puis le plan bissecteur de l'angle antérieur du prisme à être horizontal.

« Malgré cela, les résultats obtenus par Claude avec ce joujou étaient déjà très remarquables. C'est ce qui attira mon attention. Peu après avoir reçu communication de sa Note, je m'abouchai avec lui. Je ne tardai pas à reconnaître que c'était là le principe d'un instrument idéal pour l'application de la méthode des hauteurs égales de Gauss généralisée pour la détermination simultanée de la latitude et de l'heure. Il suffisait pour le rendre pratique de le munir d'un système de réglage du prisme et d'un plateau horizontal mobile portant la lunette et le bain de mercure.

« Nous fîmes construire sur ces bases un instrument chez Vion avec une lunette naturellement plus forte (grossissement 60) avec lequel nous travaillâmes pendant 18 mois, observant chacun une série tous les soirs de beau temps. Les résultats dépassaient nos espérances. Si bien que le Service Hydrographique en fit construire deux exemplaires que j'emportai au printemps de 1902 à Madagascar où je devais rester 18 mois. Je rapportai de là des résultats qui stupéfièrent les ingénieurs qui m'avaient précédé.

« Cependant, l'instrument ne répondait pas encore complètement à mes desiderata. C'était toujours le système de réglage qui laissait à désirer. Et puis le prisme n'était pas suffisamment équiangle. Favé nous ayant fait penser à l'autocollimation, nous nous abouchâmes avec Jobin, et c'est avec lui que nous réalisaâmes les trois modèles qui portent son nom.

« A ce moment, je jugeai que l'instrument, la méthode de préparation des obser-

valeur de cette belle réalisation, on peut formuler à son sujet les deux remarques suivantes :

a. La mesure de l'équation personnelle au moyen d'un appareil auxiliaire n'offre pas les mêmes garanties que son élimination à l'aide d'un micromètre impersonnel. D'autre part, l'astrolabe classique fournit l'enregistrement d'un seul temps pour chaque étoile, tandis qu'on en obtient habituellement une vingtaine avec un micromètre impersonnel, les écarts fortuits dus à l'imperfection du guidage et à l'agitation atmosphérique se trouvant ainsi notablement réduits.

b. Ainsi qu'on l'a déjà dit, l'astrolabe de Claude et Driencourt ne définit pas la distance zénithale d'observation avec toute la précision qu'on peut en attendre. L'explication de ce fait bien connu apparaît lorsqu'on suit la marche des faisceaux lumineux dans l'appareil : les deux faisceaux (*fig. 2*) qui convergent vers les images d'une même

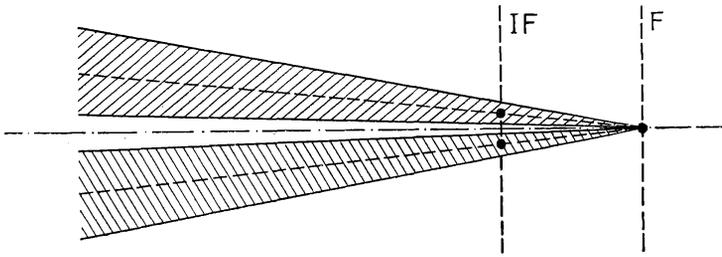


Fig. 2. — Influence de la mise au point dans l'astrolabe de Claude et Driencourt.

étoile pénètrent dans la lunette par des ouvertures distinctes, à savoir : la moitié supérieure et la moitié inférieure de la surface libre de l'objectif. Or, les axes principaux de ces faisceaux font entre eux un angle de 2 à 3°. En conséquence, si, à un instant donné, les images proprement dites coïncident dans le plan focal, il n'en est pas de même des pseudo-images intra ou extra-focales que l'on peut observer en déplaçant l'oculaire ou

vations et celle de calcul étaient suffisamment au point pour les faire connaître. Nous nous en ouvrîmes à Ollivier, Directeur de la *Revue générale des Sciences*, qui nous fit le meilleur accueil. (Numéros du 30 novembre et du 30 décembre 1905.)

« Plus tard, le *Journal de Physique* me demanda un article écrit spécialement pour les physiciens (décembre 1907).

« Après la guerre, [...] nous nous adressâmes à la Société d'Optique et de Mécanique de Haute-Précision pour un modèle simplifié que le Colonel Raguet, habile constructeur alors attaché à la S. O. M. mit tout à fait au point au point de vue mécanique.

« Enfin, à nos demandes réitérées d'un instrument d'observatoire, la S. O. M. fini par céder il y a un an, et l'instrument qu'elle a réalisé sur nos données est des plus réussis. Avec l'appareil à équation personnelle de notre système, le manipulateur de Claude, l'astrolabe grand modèle donne entière satisfaction. »

en faisant varier l'accommodation de l'œil. Il est facile de s'assurer qu'un déplacement de l'oculaire de $0,1$ mm entraîne une variation de la distance zénithale de près de $1''$, la fatigue de l'œil de l'observateur au cours d'une séance un peu longue pouvant avoir des effets du même ordre. La remarquable stabilité de l'angle du prisme n'est donc pas pleinement utilisée.

Les pupilles de sortie de l'astrolabe ordinaire sont séparées, elles aussi, ce qui offre un inconvénient supplémentaire : si l'observateur ne place pas convenablement l'œil à l'oculaire, les deux images peuvent prendre des aspects différents.

Divers dispositifs, dont quelques-uns sont décrits dans un Mémoire de M^{me} E. Chandon et A. Gougenheim (4), ont été proposés soit pour rendre l'astrolabe impersonnel, soit pour stabiliser la distance zénithale; s'ils ne sont pas entrés dans la pratique, c'est peut-être parce que chacun d'eux ne donnait qu'une solution partielle du double problème posé.

L'élaboration du nouvel astrolabe. — Vers 1938, je me suis proposé de corriger les deux défauts majeurs de l'astrolabe classique au moyen d'un dispositif unique constitué par un micromètre polarisant à double image, dont l'idée m'avait été suggérée, d'une part par une longue pratique des systèmes optiques à double image que j'avais appliqués à de nombreux problèmes, d'autre part, par la théorie des biréfringents que Paul Muller venait d'élaborer (5). Ce travail, encore inédit à l'époque, mais dont j'avais suivi le développement, fournissait le principe d'un grand nombre de combinaisons diverses, outre celle que P. Muller a appliquée à la mesure des étoiles doubles. Mon choix se fixa sur un wollaston double symétrique, parce que ce biréfringent fournit un dédoublement symétrique, stationnaire sous une incidence quasi-normale, et que les deux champs polarisés sont superposables et dépourvus de distorsion. En raison des événements, le wollaston dont j'avais besoin ne fut taillé qu'en 1946. Un premier micromètre improvisé, monté sur un astrolabe Jobin grand modèle, fut essayé en octobre 1947 à l'Observatoire de Haute-Provence, concurremment avec un grand théodolite de Wildt à niveau de Talcott appartenant à l'Institut Géographique National (6). Ces essais ayant donné des résultats concluants, l'étude d'un appareil entièrement nouveau fut alors confiée à M. Jean Texereau,

(4) *Les instruments pour l'observation des hauteurs égales en Astronomie (Rev. Hydrogr., t. 12, mai 1935)*. Voir aussi : TARDI et LAFLAVÈRE, *Traité de Géodésie*, t. 2, chap. XIII, Paris, 1955.

(5) *Bull. Astron.* t. 14, 1949, p. 177 et 257.

(6) *C. R. Acad. Sc.*, t. 227, 1948, p. 310. Voir aussi : DUHAMEL, *Déterminations astronomiques en campagne*, Paris, 1949.

au Laboratoire d'Optique de l'Observatoire de Paris. L'instrument, presque entièrement réalisé à l'atelier de l'Observatoire, par MM. Thimothée, Turati et Sottini, fut achevé en 1951, et aussitôt installé sur la grande terrasse au sud du bâtiment de Perrault, dans un pavillon léger, d'une disposition particulière qui sera décrite plus loin. Les premières observations furent faites le 6 juillet 1951. Il m'apparut aussitôt que le nouveau micromètre était capable de fournir une précision plus grande que je ne l'avais supposé, et que, en conséquence, les modes d'entraînement et de rappel que j'avais crus suffisants devaient être améliorés. Le moteur d'entraînement et son générateur de fréquence, le variateur de vitesse réglant automatiquement le mouvement de la vis selon l'azimut de l'étoile observée, enfin le système différentiel permettant à l'observateur de corriger ce mouvement, furent successivement l'objet de perfectionnements et d'essais qui occupèrent les années 1952 et 1953. M. B. Guinot fut associé aux observations à partir de février 1953. On ne se tint pour satisfait que lorsque l'observateur put se sentir entièrement maître de la position relative des deux images. Désormais, tout observateur, même novice, peut obtenir de bons résultats après quelques séances d'entraînement.

Sous sa forme actuelle, le prototype en service à l'Observatoire de Paris n'est pourtant pas exempt de défauts, mais l'étude qu'on en a faite sera mise à profit pour la réalisation du modèle définitif dont la Société *Optique et Précision de Levallois* (O. P. L.) vient d'achever les plans et dont la construction sera bientôt entreprise. Les principales différences entre le modèle de l'Observatoire de Paris et le modèle O. P. L. seront mentionnées dans ce qui suit.

Principe du micromètre impersonnel. — Soient A et B les deux images d'une même étoile visibles dans la lunette de l'astrolabe (*fig. 3*). Introduisons un prisme biréfringent dans cette lunette, en avant de

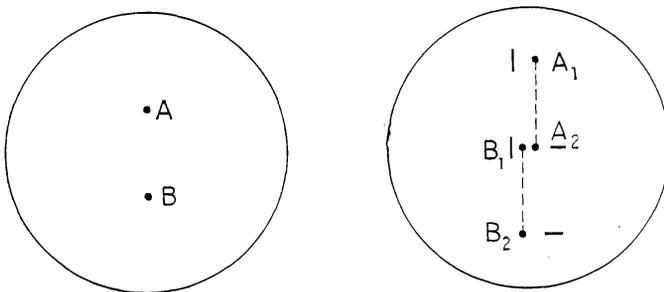


Fig. 3.

l'oculaire. Chacune des images en fournit deux autres, polarisées dans des directions perpendiculaires. En déplaçant le biréfringent parallè-

lement à l'axe de la lunette, on peut amener à coïncider les images A_2 et B_1 . Ceci fait, comme les images A et B se déplacent l'une par rapport à l'autre, en raison du mouvement diurne, il faut, pour maintenir la coïncidence, donner au prisme biréfringent un mouvement de translation parallèle, à l'axe, et de vitesse telle que l'on ait toujours :

$$A_1 A_2 = B_1 B_2 = AB.$$

Le biréfringent est fixé sur un chariot micrométrique, dont la vis porte une roue de contacts reliée à un chronographe; le mouvement du chariot étant automatiquement enregistré, l'instrument est devenu impersonnel.

Mais ce n'est pas tout. Si l'angle de dédoublement du biréfringent est égal à celui des axes principaux des faisceaux lumineux relatifs aux images A et B, les faisceaux correspondant aux images A_2 et B_1 émergent du biréfringent en ayant leurs axes parallèles. La distance zénithale d'observation ne dépend plus alors de la mise au point et les pupilles de sortie sont superposées. A la vérité, le parallélisme des axes n'est rigoureux que pour une certaine position du biréfringent, mais comme il ne s'écarte que de petites quantités de part et d'autre de cette position, ces écarts ne peuvent occasionner que de très faibles erreurs de pointé, qui, du reste, se compensent par raison de symétrie.

Les images non utilisées, A_1 et B_2 , sont supprimées par un diaphragme dont la position sera précisée un peu plus loin. L'emploi du micromètre polarisant décrit ici réduit de moitié la luminosité. Il n'y a pas d'autre remède à cet inconvénient que d'augmenter l'ouverture de l'instrument; de 6 cm dans le modèle existant, elle sera portée à 10 cm dans le modèle O. P. L.

Propriétés du Wollaston double symétrique. — Le succès du micromètre à double image appliqué à l'astrolabe dépend essentiellement du choix du biréfringent. Il y a un intérêt évident à adopter un

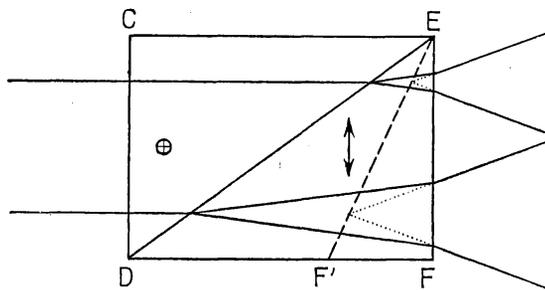


Fig. 4.

biréfringent à dédoublement symétrique, ce qui exclut les prismes du type de Rochon, et conduit à adopter un prisme de Wollaston. Mais,

Sous sa forme simple usuelle, le wollaston, comme, du reste, le rochon, présente un défaut que Paul Muller a mis en évidence : si l'on fait tomber sur la face d'entrée un faisceau de rayons parallèles, le lieu des points de rencontre des rayons dédoublés n'est pas un plan de front, mais un plan oblique EF' (*fig. 4*). En partant de cette remarque, on montre aisément que les deux images d'un même champ vu à travers un wollaston simple ne sont pas identiques ni semblables au champ lui-même, chacune d'elles étant affectée d'une distorsion; mais il est possible de compenser cet effet à l'aide d'un second wollaston simple, symétrique du premier.

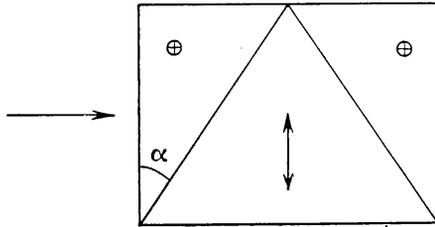


Fig. 5.

On obtient le même résultat, d'une manière plus élégante, avec un wollaston double symétrique (*fig. 5*), dont les deux champs polarisés sont dépourvus de distorsion, et dont le dédoublement est stationnaire (minimum) autour de l'incidence normale.

On calcule l'angle de coupe α du wollaston double en fonction de l'angle de dédoublement I donné *a priori*, et des deux indices du quartz naturel, par la formule suivante :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin I}{4(n_e - n_o)} = k \sin I.$$

Les résultats des mesures faites par Macé de Lépinay ⁽⁷⁾ conduisent aux valeurs suivantes de k pour trois longueurs d'onde et pour deux températures différentes :

Raie.	$k(0^\circ \text{C.})$	$k(18^\circ \text{C.})$	$I(\alpha = 50^\circ)$
C 6363	27,63	27,69	2° 28',0
D 5893	27,38	27,44	2 29,3
F 4861	26,85	26,90	2 32,4

La variation de k avec la température est trop faible pour que nous ayons à nous en occuper dans la suite, mais sa variation avec la longueur d'onde mérite un peu plus d'attention, la dispersion entre les raies C et F atteignant $1/34$ en valeur relative.

(⁷) *Ann. Fac. Sc. Marseille*, 1891, p. 5-18.

L'angle de coupe du prisme que j'utilise actuellement est de 50° ; les valeurs correspondantes de l'angle de dédoublement sont portées dans la colonne de droite du tableau ci-dessus. Quant aux pupilles d'entrée, elles sont limitées par deux rectangles égaux, disposés l'un au-dessus de l'autre. Vus à travers le biréfringent, leurs côtés horizontaux paraissent irisés : en supposant la superposition de ces pupilles réalisée pour la raie D, l'écart atteint $3'$ pour la raie F. C'est aussi l'angle que font entre eux les faisceaux émergents pour cette longueur d'onde : il est facile de s'assurer qu'un changement de mise au point de $0,1$ mm ne produit alors qu'une variation de $0'',03$ de la distance zénithale. On sait, d'autre part, qu'un objectif astronomique à deux verres doué d'aberration chromatique secondaire (spectre secondaire) joue le même rôle qu'un filtre sélectif, en réduisant à une bande spectrale relativement étroite le domaine des radiations efficaces. La valeur calculée de $0'',03$ doit donc être considérée comme une limite supérieure, atteinte seulement dans le cas d'étoiles très brillantes.

Le chromatisme du wollaston apparaît aussi sur les images stellaires, lorsque leur dédoublement angulaire est grand. Les images A_1 et A_2 sont constituées par deux petits spectres opposés, tournant leurs extrémités rouges l'une vers l'autre. De même, les images A_2 et B_1 que l'on cherche à faire coïncider sont dispersées en sens inverses. La longueur de chacun de ces spectres entre les raies C et F est $1/68$ de la distance AB. Au cours de l'enregistrement, cette distance varie approximativement de $-100''$ à $+100''$; la longueur des spectres varie donc de $-1'',5$ à $+1'',5$. Les effets de ce chromatisme sont petits, et, du reste, ils se compensent exactement par raison de symétrie.

Il était nécessaire, cependant, de s'assurer que les observations n'étaient affectées d'aucune équation de couleur. On a fait une étude statistique

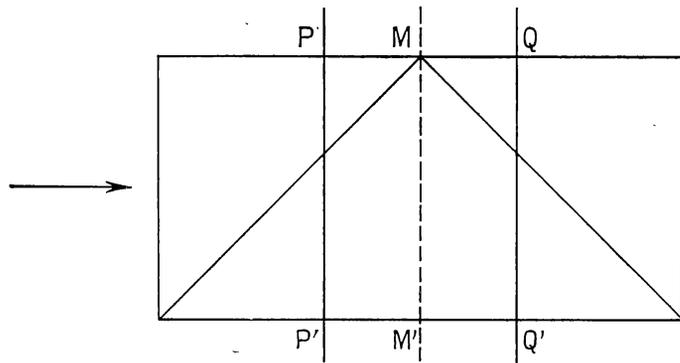


Fig. 6.

des résidus fournis par quelques centaines d'étoiles, en les classant par types spectraux (voir le Mémoire de M. B. Guinot, p. 304). Le résultat

1854BIAst...18...251D
 négatif de cette étude a démontré l'inutilité des recherches commencées en vue de la construction d'un biréfringent achromatique, aussi ces recherches ont-elles été interrompues.

Pour achever l'étude du wollaston double, définissons ses plans principaux (*fig. 6*) : le premier, PP' , est le lieu des points-objets virtuels non dédoublés par le wollaston. Il s'en forme une image intermédiaire réelle dans le plan médian MM' , l'image définitive, virtuelle, étant située dans le second plan principal QQ' . En d'autres termes, si l'on fait coïncider le premier plan principal PP' avec le plan focal de la lunette et si l'on met l'oculaire au point sur le second plan principal QQ' , les images ne sont pas dédoublées; A_1 et A_2 coïncident, ainsi que B_1 et B_2 . Mais, si, à partir de cette position, on déplace le wollaston de la longueur x , parallèlement à l'axe de la lunette, le dédoublement apparaît, sa valeur angulaire étant $\frac{x \sin I}{F}$, en désignant par F la distance focale de l'objectif.

Pour calculer la distance des plans principaux au plan médian, on peut adopter pour la valeur de l'indice la moyenne de l'indice ordinaire et de l'indice extraordinaire du quartz. En effet, les faisceaux admis dans le wollaston s'écartent peu de son axe de figure, ils sont donc ordinaires sur une moitié du trajet, extraordinaires sur l'autre moitié. La longueur totale du wollaston utilisé étant de 31 mm, on a sensiblement

$$e_D = PM = 5,5 \text{ mm},$$

et, pour les deux autres radiations :

$$e_D - e_C = 0,016 \text{ mm}, \quad e_F - e_D = 0,036 \text{ mm}.$$

Or, entre les raies D et F, la distance focale d'un objectif usuel à deux verres croît de 0,001 en valeur relative ⁽⁸⁾, soit ici, de 0,7 mm. La dispersion du plan principal du biréfringent paraît donc négligeable devant celle du plan focal de la lunette. La présence du wollaston déplace un peu vers le rouge la position du minimum focal, mais l'effet est si petit qu'on peut se dispenser d'en tenir compte dans le calcul de l'objectif; il en est de même pour la légère surcorrection d'aberration de sphéricité due à l'interposition du biréfringent ⁽⁹⁾. Du côté de l'image, la dispersion du plan QQ' peut être considérée, elle aussi, comme négligeable.

Rôle de la diffraction. — L'objectif, dont la distance focale est de 699,5 mm, a un diamètre d'ouverture utile de 85 mm. La face de sortie du prisme peut donc s'y inscrire tout entière, mais comme on a éliminé les parties voisines des arêtes, les pupilles d'entrée sont deux rectangles

⁽⁸⁾ A. DANJON et A. COUDER, *Lunettes et télescopes*, Paris, 1935, p. 109.

⁽⁹⁾ A. DANJON et A. COUDER, *loc. cit.*, p. 291.

dont les côtés mesurent seulement 56 et 26 mm; elles sont séparées par une bande horizontale d'environ 4 mm de hauteur.

La partie centrale de la figure de diffraction théorique correspondant à chacune de ces pupilles est limitée par des franges noires délimitant un rectangle de 9",0 de hauteur sur 4",2 de largeur pour $\lambda = 0,58 \mu$. En fait, l'œil perçoit une tache lumineuse ovale, limitée approximativement à l'isophote 1/10 (fig. 7), la brillance au centre étant 1. Les axes de cette ligne isophote mesurent respectivement 6",7 et 3",1. A cette tache principale, s'ajoutent deux aigrettes formées de points lumineux.

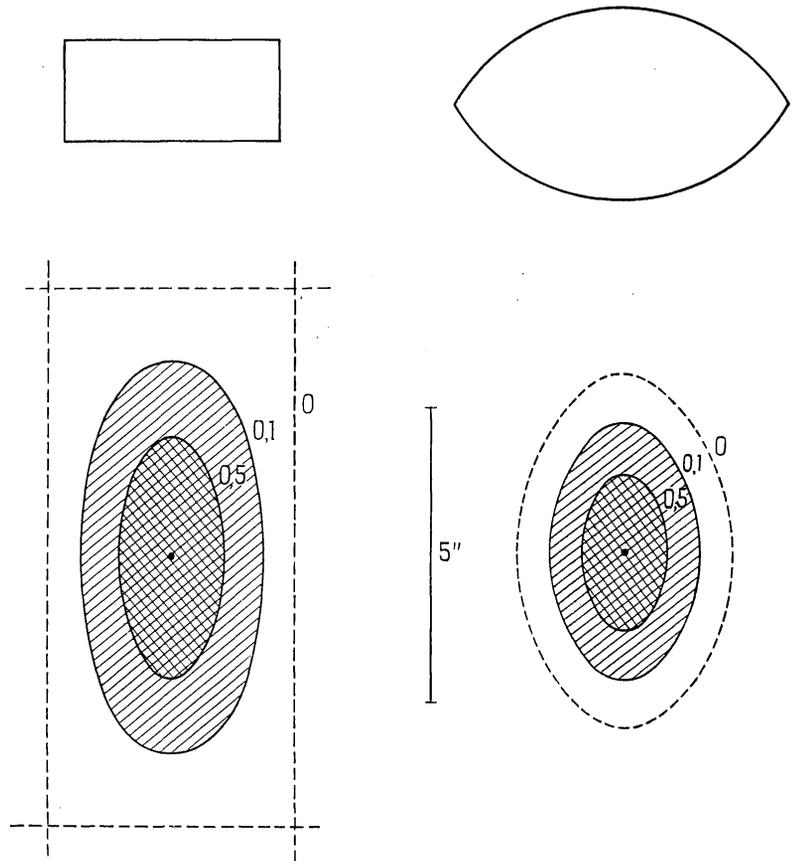


Fig. 7.

Fig. 8.

Fig. 7 et 8. — Pupilles d'entrée et images de diffraction de l'astrolabe de 6 cm (fig. 7) et de l'astrolabe O. P. L. de 10 cm (fig. 8).

C'est du moins ce que l'on observe avec des étoiles aussi brillantes que Véga ou Arcturus. Dans le cas d'étoiles très faibles, les aigrettes n'apparaissent pas et le disque central a des dimensions plus réduites. Les axes de l'isophote 1/2 mesurent respectivement 4",1 et 1",9 : telles sont apparemment les dimensions de l'image d'une étoile près de la limite de visibilité, laquelle correspond à la magnitude 5,3.

L'astrolabe modèle O. P. L. aura 10 cm d'ouverture et 100 cm de distance focale. On s'est proposé de rechercher la forme la plus avantageuse à donner aux pupilles, en considérant à la fois la luminosité de l'appareil et les effets de la diffraction. La luminosité serait maximum si l'on utilisait toute la surface de l'objectif, les pupilles étant deux demi-cercles limités par un diamètre horizontal, comme celles de l'astrolabe classique. Mais en calculant la répartition de l'éclairement dans les images extrafocales données par une ouverture demi-circulaire, M. Bernard Guinot a trouvé que le maximum d'éclairement ne coïncidait pas, en général, avec le point de rencontre du plan visé et de la droite joignant le foyer principal au centre de gravité du demi-cercle. Le calcul lui a fourni, pour le lieu de ce maximum, une ligne sinueuse qui s'écarte notablement, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, de la droite ainsi définie. Or, pour que le wollaston joue efficacement son rôle en stabilisant la distance zénithale des visées, il faut que le lieu du maximum d'éclairement soit une droite. Cette condition nécessaire ne peut être satisfaite que si le contour de la pupille d'entrée possède deux axes de symétrie rectangulaires.

En conséquence, il a été décidé de placer devant l'objectif un diaphragme découvrant deux lunules semblables à celle de la figure 8. Cette disposition élimine les portions du prisme voisines des arêtes, ce qu'il convient de faire en tout état de cause. La fraction 0,22 de la surface de l'objectif se trouve ainsi inutilisée, avec une perte de luminosité qui, exprimée en magnitude, est de 0,3. Mais par rapport à l'appareil actuellement en service, le gain de luminosité reste encore de 0,8 en magnitude, et l'on pourra observer des étoiles de magnitude 6,1 au moins. Les pupilles en forme de lunules fournissent des images de diffraction plus avantageuses que les pupilles rectangulaires (*fig. 8*). En effet, le premier anneau noir limitant la tache centrale sera une ovale ayant pour axes 6",2 et 3",7 et non un rectangle; les axes de l'isophote $1/10$ mesureront respectivement 4",3 et 2",6, et ceux de l'isophote $1/2$, 2",5 et 1",5; le rapport des axes étant 1,65, au lieu de 2,15 pour l'instrument actuel à pupilles rectangulaires. La surface des images stellaires sera réduite de moitié; elles seront moins allongées dans le sens vertical, et l'observateur appréciera mieux leur coïncidence; enfin, elles seront dépourvues d'aigrettes.

La discussion des observations montre que l'écart quadratique moyen (observation moins calcul), pour une étoile observée à l'astrolabe de 6 cm, prise dans une série qui en comprend 20 ou 25, peut s'abaisser à moins de 0",20, c'est-à-dire à moins de $1/34$ du diamètre vertical de l'image de diffraction. Si l'on parvenait à la même précision relative avec l'astrolabe de 10 cm, l'écart moyen s'abaisserait dans les mêmes conditions à 0",12; c'est précisément l'ordre de grandeur supposé des erreurs internes du catalogue fondamental FK 3.

Il va sans dire que, pour apprécier correctement la coïncidence avec toute la précision que comporte le micromètre à double image, il est nécessaire d'employer un grossissement nettement plus élevé que le grossissement résolvant ⁽¹⁰⁾. Les deux images étant placées l'une près de l'autre, à une distance égale à 2 ou 3 fois leur diamètre vertical, l'observateur maintient leurs centres sur une même horizontale en agissant sur la vis micrométrique par l'intermédiaire d'un différentiel. Deux fils parallèles horizontaux éclairés sur fond noir encadrent le couple et définissent la direction à donner à la ligne des centres. L'oculaire composé de l'astrolabe de 6 cm donne un grossissement de 125; le diamètre vertical des images apparaît donc sous un angle de 14', un angle de 0",20 sur l'image focale correspondant à 25" sur l'image rétinienne.

Les pupilles de sortie *superposées* mesurent 0,45 mm sur 0,21 mm.

Réalisation de l'astrolabe de 6 cm. — Comme il s'agissait de réaliser un appareil à coïncidences d'images, il a paru qu'il y aurait plus d'avantages que d'inconvénients à couder plusieurs fois les faisceaux lumineux par des réflexions sur des miroirs plans, afin de réduire l'encombrement de l'instrument et de le rendre aussi compact que possible. La longueur totale de l'instrument non coudé eût atteint 120 cm; des vibrations nuisibles dues aux engrenages du micromètre placé à un bout de ce long instrument auraient pu se transmettre au bain de mercure placé à l'autre bout. Il y avait du reste intérêt à disposer le bain de mercure aussi près que possible de l'axe de rotation vertical de l'instrument, pour éviter que le mercure ne s'agite lorsqu'on passe d'un azimut à un autre, et ne se répande hors de sa cuvette. De petits déplacements des miroirs, qui auraient de graves inconvénients dans un instrument à simple image, affectant de la même manière les deux images données par l'astrolabe, sont sans effet sur leur coïncidence. L'angle d'incidence (17°,5) est assez petit pour qu'on n'ait pas à redouter un astigmatisme perceptible dû à la courbure résiduelle de ces miroirs.

Les deux miroirs interposés entre l'objectif et le wollaston (*fig. 9*) sont en silice fondue aluminée. Leurs surfaces étant parallèles, l'axe moyen des faisceaux deux fois réfléchis est horizontal, ce qui facilite grandement l'installation du micromètre. Chacun de ces miroirs s'appuie sur trois touches solidaires de la caisse de l'instrument, trois autres touches, pressées par des ressorts, étant appliquées au dos du miroir, en regard des premières.

Après le passage de la lumière dans le wollaston, une troisième réflexion sur un prisme équilatéral dévie la lumière de 120° et l'envoie vers l'oculaire. Un véhicule à champ plan, d'un type créé par M. A. Couder pour

(10) A. DANJON et A. COUDER, *loc. cit.*, p. 28.

agrandissement des images focales données par un objectif astronomique, est interposé entre le wollaston et l'oculaire proprement dit; son grandissement est de 3. On a placé le prisme entre les verres de ce véhicule. La distance focale de l'oculaire de Ramsden est de 16 mm.

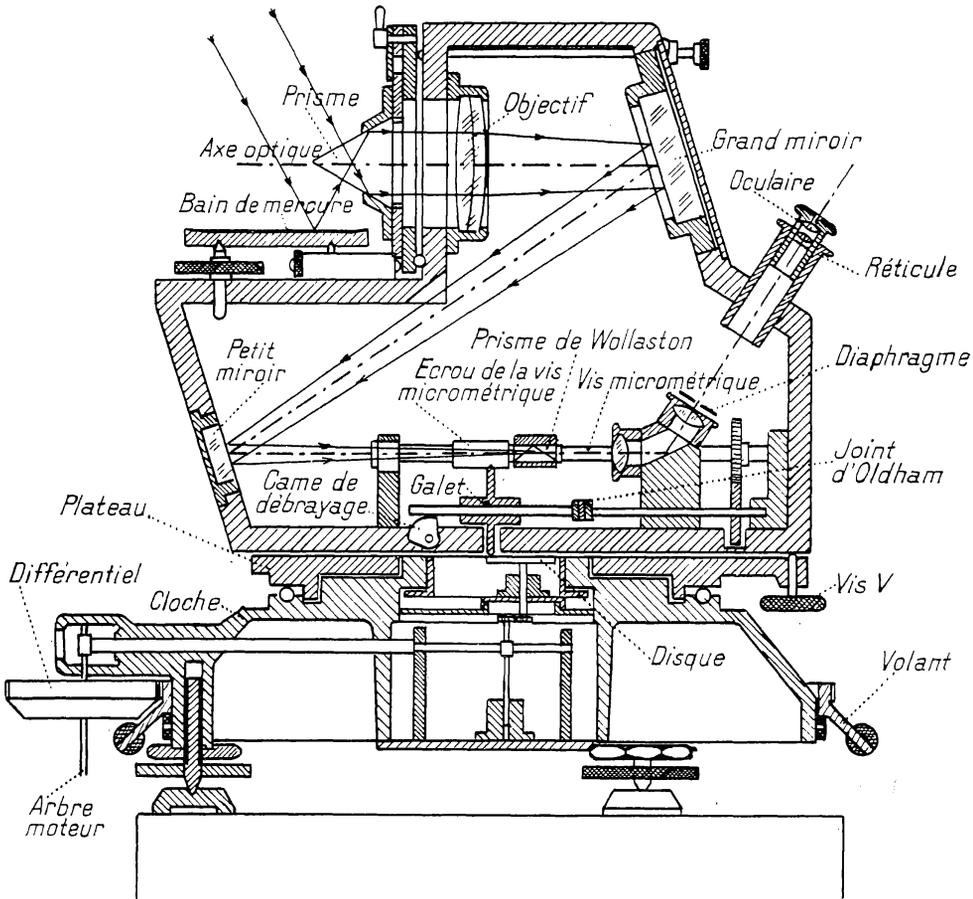


Fig. 9. — Coupe de l'astrolabe de 6 cm.

Un écran percé d'une fente horizontale et que l'on peut escamoter est placé sur le trajet de la lumière; il reçoit l'image de l'objectif fournie par le véhicule, et ne laisse passer que les faisceaux utiles, c'est-à-dire ceux qui correspondent aux images A_2 et B_1 . Les faisceaux correspondant aux deux autres images sont arrêtés par les joues de la fente.

Un réticule est disposé en avant de l'oculaire, dans le plan de l'image finale. Il porte les fils d'araignée horizontaux auxquels on rapporte la direction du couple formé par les deux images de l'étoile; il porte aussi des fils verticaux dont l'usage sera exposé plus loin.

Les pièces optiques de la lunette : objectif, miroirs, véhicule et prisme de renvoi, oculaire, ont été centrés au laboratoire par M. Jean Texereau.

Grâce à la rigidité de la caisse d'aluminium qui contient ces diverses pièces, leur réglage s'est montré parfaitement stable.

Les organes de réglage du prisme sont d'une exécution particulièrement délicate. La platine métallique sur laquelle il est fixé peut se mouvoir autour d'un point fixe. D'autre part, elle est appuyée par des ressorts sur les extrémités de deux vis micrométriques à axes horizontaux. L'une de ces vis permet de faire tourner le prisme autour d'un axe horizontal, l'autre autour d'un axe vertical. L'oculaire de Ramsden étant remplacé par un oculaire spécial pour l'autocollimation sur fond noir ⁽¹¹⁾, on agit sur ces deux vis pour orienter la face de sortie du prisme perpendiculairement à l'axe optique de l'instrument. Il reste à le faire tourner autour d'un axe parallèle à l'axe optique, afin de rendre ses arêtes horizontales. On ne peut pas se contenter de faire cette opération une fois pour toutes, au début de chaque séance, comme la précédente; l'horizontalité des arêtes doit être assurée pour chaque étoile, et l'observateur ne dispose pour cela que de quelques secondes. L'organe de réglage doit donc être d'un fonctionnement précis, fidèle et sûr. M. Texereau a conçu et fait réaliser un système démultiplié, comparable pour la douceur et la fidélité de son fonctionnement à la mise au point fine d'un microscope. Les observations y ont beaucoup gagné en qualité.

C'est en agissant sur cet organe que l'observateur règle à son gré l'écartement du couple formé par les deux images de l'étoile. Si les images de diffraction empiétaient l'une sur l'autre, on risquerait de commettre une erreur d'appréciation importante sur la direction de la ligne des centres; si ces images étaient très écartées, l'observation de cette direction perdrait beaucoup de sa sensibilité. De bons résultats ont été obtenus pour un écartement d'une dizaine de secondes, mais il faut laisser ce point à l'appréciation de l'observateur.

Ce mode d'observation rappelle celui des étoiles doubles. On sait que tout observateur commet une erreur systématique sur la détermination de l'angle de position à l'aide d'un micromètre; la direction du couple, que l'on juge identique à celle des fils, fait en réalité avec elle un angle petit, mais non nul. Si, dans le cas présent, cette erreur reste invariable au cours de la séance, elle affecte uniformément la distance zénithale de toutes les étoiles observées, et par conséquent, elle est sans effet sur les déterminations de temps et de latitude. On la stabilise en plaçant toujours les deux images à la même distance, indépendamment de l'éclat des deux astres; *l'image non réfléchi sur le mercure étant toujours située à la droite de l'autre*, pour fixer les idées. L'observateur acquiert très vite l'habitude de cette disposition, qu'il réalise ensuite sans y penser.

⁽¹¹⁾ A. DANJON, *Oculaire nadiral à images brillantes sur fond obscur* (*Bull. Astron.*, t. 12, 1940, p. 413).

La distance zénithale d'une étoile observée à l'astrolabe dans le premier vertical, à Paris, varie de $9''{,}901$ par seconde de temps moyen. Dans un astrolabe ordinaire, la distance verticale des deux images varie alors de $19''{,}802$. Dans un vertical d'azimut Z , la variation est réduite dans un rapport égal à $\sin Z$. La vitesse relative des deux images données par l'astrolabe actuel est de $0{,}06715$ mm par seconde dans le premier vertical. Pour compenser leur déplacement propre, il faut donner au wollaston une vitesse de $1{,}545$ mm/s. La vis du micromètre ayant un pas de $1{,}5$ mm, elle accomplit une révolution en $0^s{,}971$. Dans un azimut quelconque, la durée du tour de vis est donc de $0^s{,}971/\sin Z$. Dans tous les cas, un tour de la vis correspond à une variation de la distance zénithale de $9''{,}61$.

Le bâti du micromètre, le chariot et la vis sont en acier, l'écrou est en bronze. Le diamètre de la vis est de 12 mm sur les filets. Le chariot est une pièce massive, en forme de T, reposant sur le bâti par l'intermédiaire de trois billes engagées dans des rainures en forme de V, fraisées à la partie supérieure du bâti (*pl. I*). Des ressorts à boudin, dont les axes sont situés dans le même plan que les rails, l'axe de la vis et l'axe du wollaston, suppriment le jeu de la vis. Ils sont très longs, et donnent une force de rappel pratiquement constante. L'écrou est relié au chariot par un bras solidaire de cet écrou, et qu'un ressort maintient en contact avec une surface d'appui solidaire du chariot. On évite ainsi toute contrainte nuisible. L'étude de la vis n'a fait apparaître ni erreur progressive ni erreur périodique supérieure aux erreurs de mesure (de l'ordre de 1μ).

La vis porte un tambour divisé en 100 parties, ainsi qu'une roue de contacts, constituée par un disque de céloron, matière isolante, pressé entre deux ressorts métalliques intercalés dans le circuit du chronographe. Sur la moitié de sa périphérie, la matière isolante a été entaillée, et remplacée par une partie métallique. Le circuit se trouve donc coupé pendant une demi-révolution de la vis, et fermé pendant l'autre moitié, sans que la tension des ressorts varie. Les deux faces de ce disque mi-parti ont été soigneusement dressées au tour, pour éviter tout ressaut au moment des fermetures et des ouvertures. Le chronographe enregistre les unes et les autres. La moyenne des temps enregistrés correspond donc à une même lecture du tambour, que la vis tourne dans un sens ou dans l'autre.

La vitesse relative des pièces en contact étant de 10 cm/s, pour les étoiles horaires (c'est-à-dire voisines du premier vertical), les fermetures et les ruptures sont beaucoup plus franches qu'avec un système à ressorts mobiles et à cames, dont la vitesse est toujours très faible.

Un second contact glissant, porté par le chariot, limite l'enregistrement à six tours de part et d'autre de la coïncidence proprement dite. En fait, on n'utilise que 20 inscriptions, correspondant à 10 fermetures

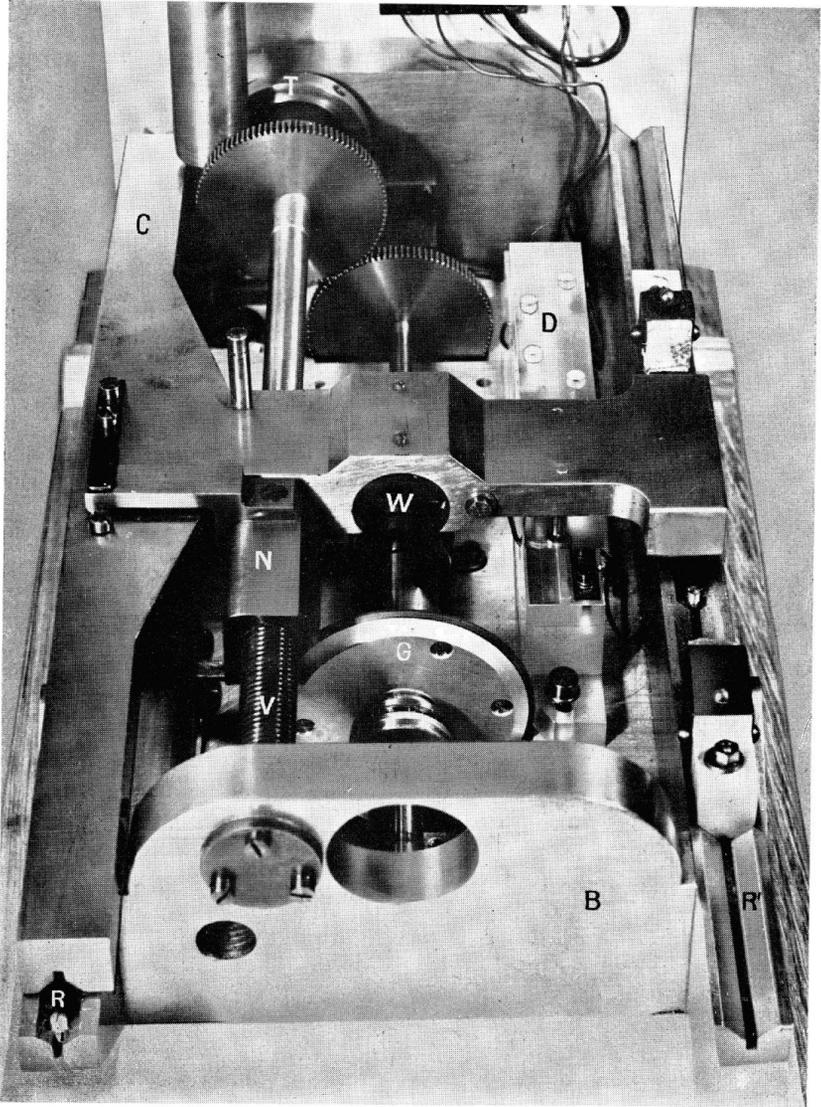


Planche I.

B, bâti du micromètre; RR', rails du micromètre; V, vis micrométrique; N, écrou; C, chariot; W, emplacement du wollaston; G, galet d'entraînement; T, tambour des contacts; D, distributeur.

Le véhicule et son prisme ne sont pas en place, ni les ressorts de rappel.

et 10 ruptures du contact. La durée de l'observation n'est donc que d'une dizaine de secondes pour une étoile horaire, ce qui est insuffisant pour éliminer les effets des écarts de guidage et de l'agitation atmosphérique. La disposition de l'astrolabe de 6 cm ne permettait pas d'accroître cette durée, mais il a été décidé de doter l'astrolabe O. P. L. de deux distributeurs de contacts, l'un pour les étoiles horaires, l'autre pour les étoiles de latitude. Le premier permettra de porter à 20 s la durée de l'enregistrement dans le premier vertical.

Désignons par v_0 la lecture du tambour pour la position du dédoublement nul; on détermine v_0 par une autocollimation sur un miroir plan, en faisant coïncider les deux images d'un même fil horizontal. Soit maintenant v_m la lecture du tambour correspondant à la moyenne des ouvertures et des fermetures du contact. En général, $v_0 - v_m$ n'est pas nul. Autrement dit, la moyenne des temps enregistrés ne fournit pas l'instant de la coïncidence vraie, c'est-à-dire du passage à 30° du zénith. Mais, dans la mesure où la différence $v_0 - v_m$ reste constante, cette moyenne correspond à une distance zénithale déterminée, ce qui permettrait de l'utiliser sans correction. En fait, ainsi qu'on l'exposera ailleurs, il a paru préférable de déterminer v_0 plusieurs fois au cours de la soirée, afin de contrôler la stabilité du micromètre, et toutes les observations sont ramenées à la lecture v_0 . On les corrige aussi de la réfraction, pour contrôler l'angle du prisme.

Lorsqu'on utilise un micromètre dépourvu de fils, rien ne signale à l'observateur la position du chariot. Or, il faut amener ce chariot à bout de course avant chaque passage, dans un sens ou dans l'autre suivant que l'étoile est à l'Est ou à l'Ouest. Dans ces deux positions extrêmes du chariot, un voyant s'allume; il est rouge à l'Est, vert à l'Ouest. Le chronographe n'étant pas placé à proximité de l'observateur qui ne peut l'entendre frapper, un signal sonore indique le début et la fin de chaque enregistrement. Ce sont là des accessoires importants, dont l'usage confère à l'observateur le sentiment de sécurité dont il a besoin pour exécuter rapidement et sans faute les opérations simples, mais rapprochées dans le temps, dont le soin lui incombe. Convenablement entraîné, il parvient à enregistrer sans aucune précipitation des passages se succédant à 50 s d'intervalle.

La caisse de l'instrument, qui porte à l'avant une petite plate-forme munie de vis calantes destinée à recevoir le bain de mercure, repose sur un plateau supporté lui-même par la cloche qui sert de base à tout l'appareil. Ce plateau est mobile en azimut; on peut l'immobiliser grâce à une pince de calage, et lui donner de petits déplacements au moyen d'une vis de rappel; l'appareil doit rester immobile en azimut pendant l'observation de chaque étoile. La face supérieure du plateau porte deux bossages, qui, avec la pointe de la vis V (*fig. 9* et *pl. II*), constituent

les trois points de contact sur lesquels repose par son propre poids la caisse de l'instrument. En agissant sur la vis, on fait tourner l'astrolabe autour de l'axe horizontal déterminé par les deux bossages, et l'on peut ainsi amener les images de chaque étoile à se former entre les fils horizontaux du réticule.

Pour orienter l'appareil en azimut, l'observateur vise, avec un oculaire coudé, une graduation en degrés tracée sur la partie supérieure de la cloche. D'autre part, il peut transformer l'appareil en un astrolabe ordinaire; il lui suffit pour cela d'abattre, entre le second miroir et le wollaston, une prisme parallélépipédique qui envoie la lumière de l'étoile vers un oculaire latéral à grand champ et à faible grossissement, ce dispositif jouant ainsi le rôle d'un chercheur.

La cloche est munie de vis calantes reposant sur un pilier en ciment, par l'intermédiaire de crapaudines. Une partie du mécanisme d'entraînement est logée dans un évidement cylindrique ménagé au centre de la cloche.

Mécanisme d'entraînement du micromètre. — Décrivons ce mécanisme ainsi que l'organe de rappel destiné à corriger le mouvement de la vis du micromètre à la volonté de l'observateur. La mise au point de ces dispositifs a été longue et laborieuse, mais chacun des perfectionnements qu'on y a apportés a été marqué par un gain de précision.

Un moteur synchrone, placé au bas du pilier de l'instrument, tourne à vitesse constante et sans aucune interruption pendant toute la durée des observations. Il est alimenté par un générateur hétérodyne de fréquence réglable, ce qui permet de fixer sa vitesse à la valeur qui correspond à la latitude du lieu. Ce générateur, accessoire coûteux, n'est pas indispensable; il sera remplacé dans l'astrolabe O. P. L. par un variateur mécanique, le moteur étant alimenté par le secteur.

Dans l'évidement central de la cloche, est placé un disque circulaire tournant, dont l'axe de rotation, vertical, est entraîné par un système de tiges et de pignons relié au moteur (*pl. II et III*). Sa vitesse est donc constante. Sur la face supérieure du disque, repose un galet, dont l'axe horizontal est relié par un joint d'Oldham à l'axe du pignon actionnant le micromètre. On peut embrayer ou débrayer le galet à l'aide d'une came qui permet de l'abaisser ou de le relever à volonté. On ne le laisse pas en prise en dehors des courts instants consacrés à l'observation de chaque étoile. Si l'observateur oubliait de le relever à la fin de l'enregistrement, un système de sécurité à déclenchement automatique y pourvoirait.

Le galet est entraîné par friction, cette disposition assurant la liberté nécessaire aux mouvements de l'astrolabe; elle se prête en outre à la réalisation d'un variateur de vitesse, communiquant automatiquement

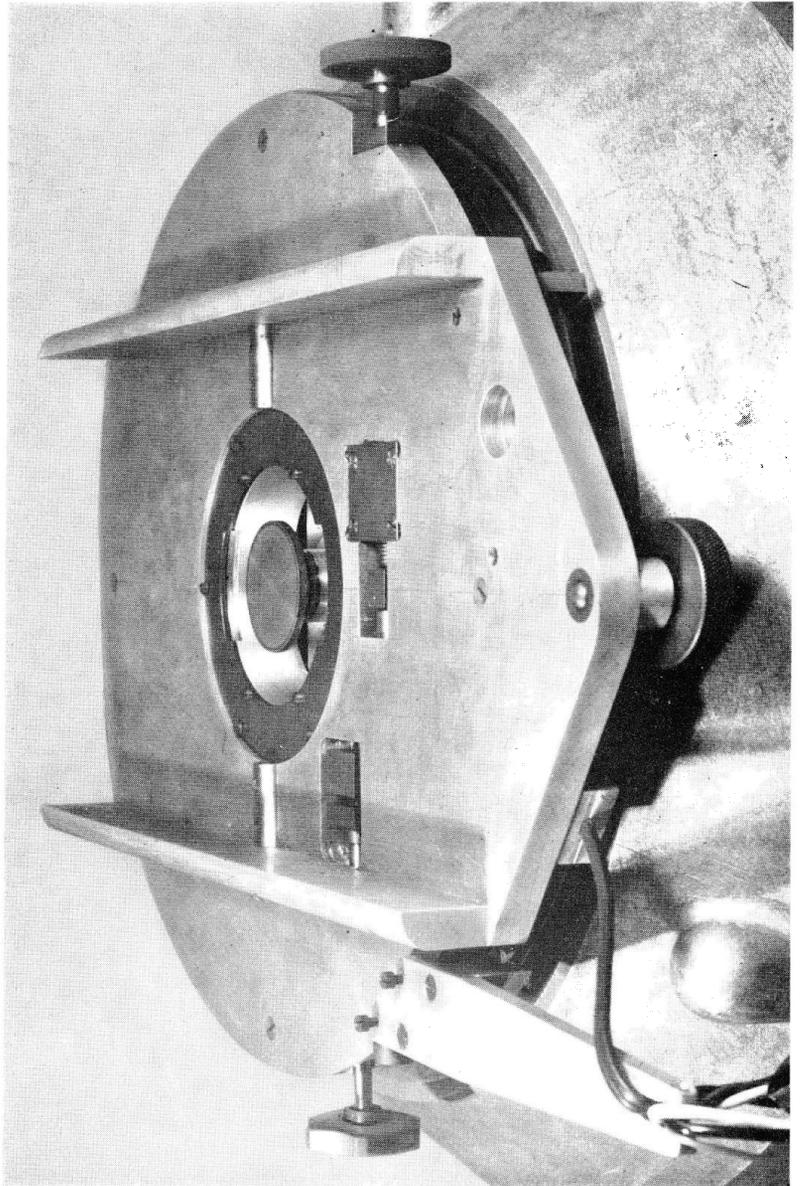


Planche II. — Plateau et disque d'entraînement du micromètre. Le plateau est pointé vers le Nord.

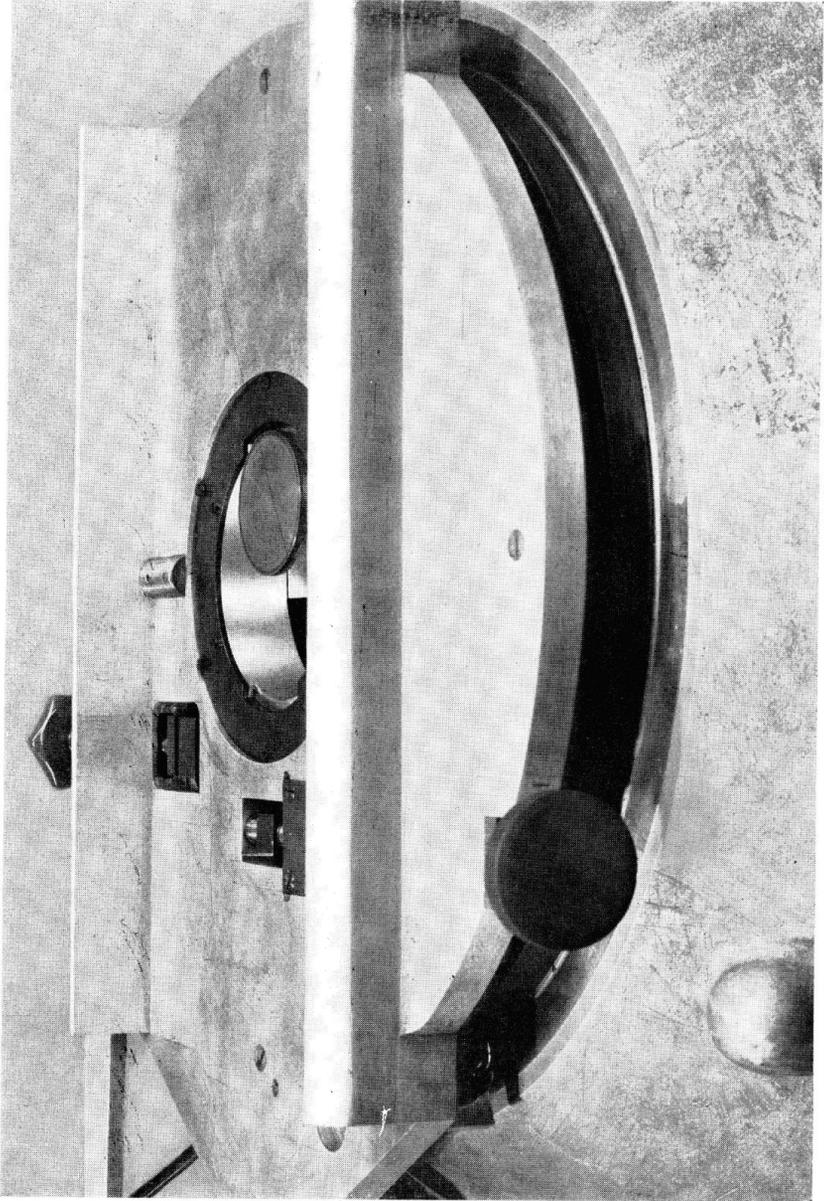


Planche III. — Plateau et disque d'entraînement du micromètre. Le plateau est pointé vers l'Est.

à la vis une vitesse proportionnelle au sinus de l'azimut. L'utilité d'un réglage automatique m'était apparue au cours des essais préliminaires de 1947. Dans la première construction de 1951, le galet reposait sur la génératrice supérieure d'un cylindre dont l'axe était horizontal et perpendiculaire au méridien; j'espérais que le galet obéirait docilement à la composante de la vitesse d'entraînement parallèle à son plan, comme le fait la roulette intégrante d'un planimètre. Mais à l'expérience, et dès le premier jour, ce dispositif fut reconnu inutilisable, car, dès que l'angle de l'axe du galet et de l'axe du cylindre dépassait une quarantaine de degrés, le roulement avec glissement s'accompagnait d'un frottement si considérable que le moteur s'arrêtait. Si, pour éviter cet inconvénient, on réduisait la pression du galet sur le cylindre, le micromètre n'était pas entraîné.

La substitution d'un disque plan au cylindre a permis de maintenir au parallélisme les vitesses des deux mobiles en leur point de contact, et d'éviter ainsi tout frottement nuisible et tout glissement : il suffit pour cela que l'axe de rotation du disque soit dans un plan vertical contenant l'axe du galet. Après de longues hésitations, j'ai choisi la disposition suivante entre plusieurs autres également possibles, comme la plus facile à mettre en pratique, et la plus sûre.

Le point de contact O du galet G (*fig. 10* en projection horizontale) sur le disque D est situé sur l'axe de rotation vertical de l'astrolabe; donc, lorsqu'on dépointe l'instrument en azimut, le galet (s'il est abaissé)

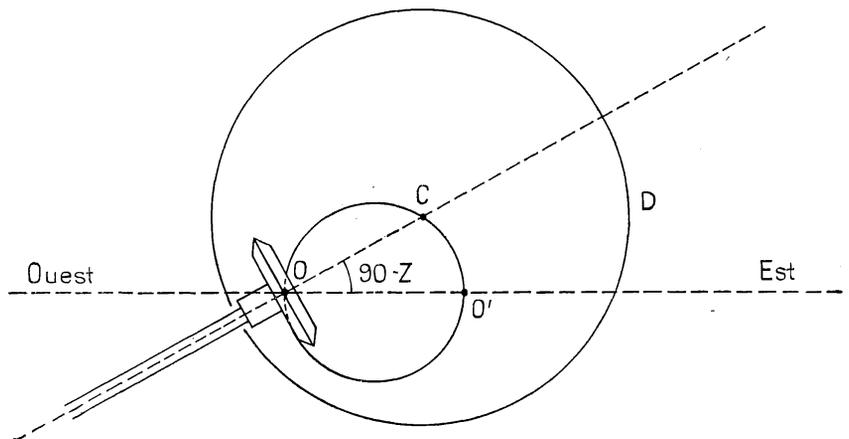


Fig. 10. — Disposition du disque et du galet d'entraînement, l'astrolabe étant pointé vers le Nord-Est.

pivote autour de son point de contact O . L'axe C du disque, situé, comme on l'a dit, dans le plan vertical contenant l'axe du galet, doit se trouver à une distance du point O proportionnelle au sinus de l'azimut. Cet axe C est donc une génératrice d'un cône circulaire droit, dont la section droite

est un cercle passant par O, et ayant un diamètre OO' perpendiculaire au méridien. Un pignon denté, relié au moteur, est centré sur l'axe A du cylindre (*fig. 11*); il entraîne le disque par l'intermédiaire d'un second pignon calé sur l'axe C, les deux pignons restant en prise quand on fait tourner l'astrolabe en azimut. La figure montre les positions respectives

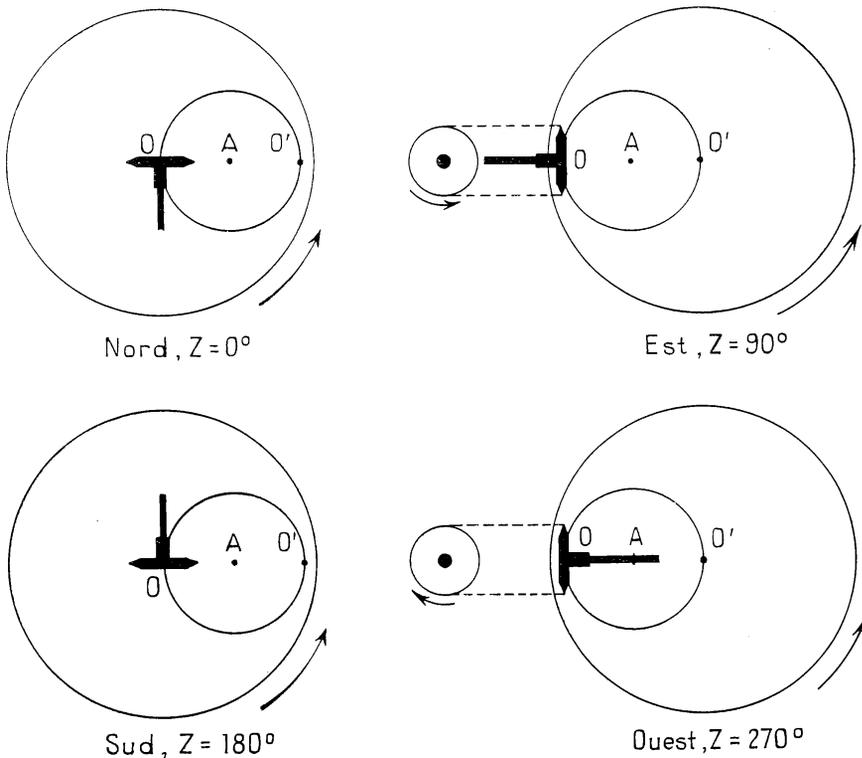


Fig. 11.

du galet et du disque quand on pointe l'instrument successivement vers les quatre points cardinaux; la vitesse change de sens automatiquement quand on franchit le méridien, où elle s'annule.

Par rapport au plateau P, l'axe C décrit un plan, sa course totale étant égale au double du diamètre OO' du cylindre. Cet axe C passe dans une douille solidaire d'une coulisse guidée par deux glissières (*fig. 12*) dont la position est déterminée par une came circulaire, de centre O' , portée par la cloche fixe. La came est évidée pour livrer passage au disque et à son axe.

L'espace dont on disposait pour loger ce mécanisme étant exigu, il a fallu se contenter d'un disque de 42 mm de diamètre dont la course par rapport au plateau est seulement de 40 mm ($OO' = 20$ mm). Le galet a un diamètre de 60 mm; il est formé d'une feuille de caoutchouc synthétique pressée entre deux joues métalliques. Le caoutchouc dépasse un peu sa monture; on a meulé cette jante pour la rendre exactement

circulaire. Son adhérence sur le disque d'acier est excellente, à la condition, toutefois, que les deux surfaces en contact soient rigoureusement exemptes de matières grasses. Après plusieurs années de fonctionnement, aucune trace d'usure n'est apparue sur la jante de caoutchouc.

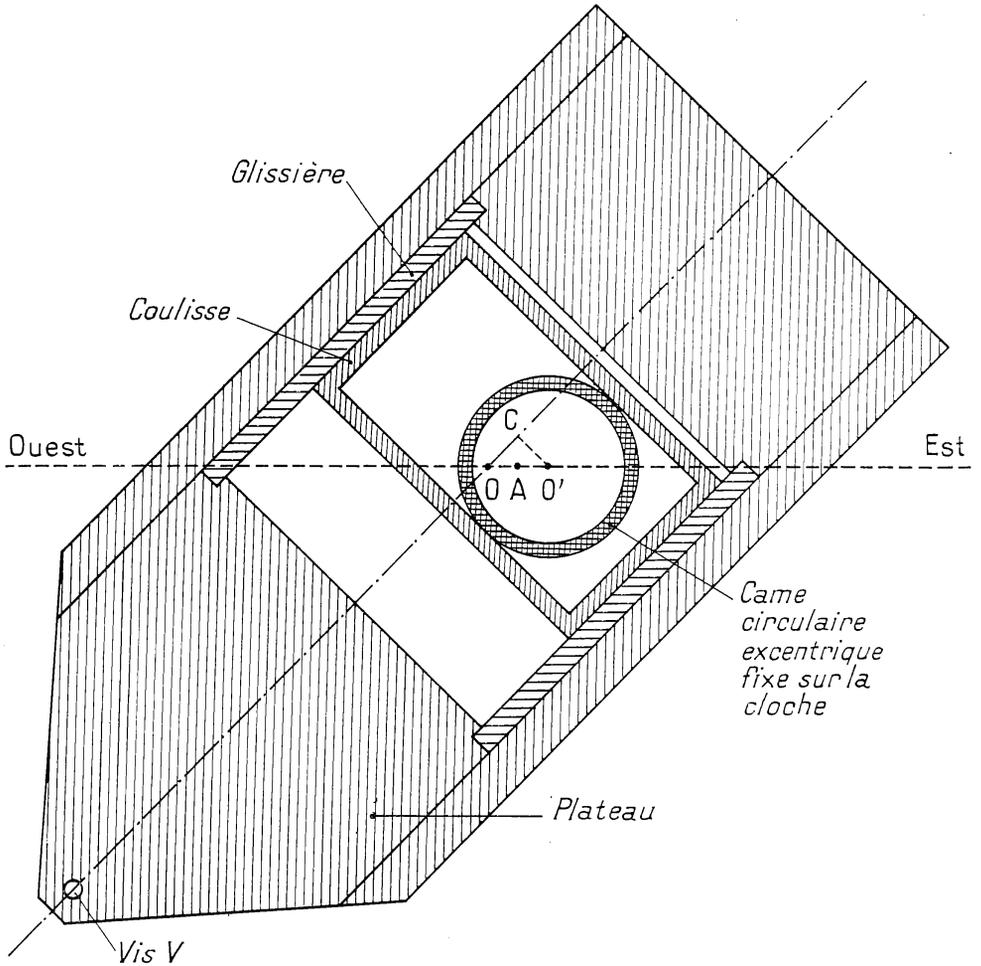


Fig. 12. — Mécanisme de guidage de l'axe du disque.

C, axe du disque porté par la coulisse;

A, axe du pignon fixé sur la cloche et qui engrène avec le pignon du disque.

Dès la mise en service du variateur à disque, des mesures de vitesse ont été faites dans divers azimuts. Le tableau suivant donne la valeur du tour de vis mesurée au chronographe Belin pour diverses valeurs de l'azimut Z ; la vitesse du moteur avait été réglée exceptionnellement de telle manière que le tour de vis soit de 1 s dans le premier vertical.

Z.....	90°.	60°.	30°.	20°.	10°.	8°.	6°.	4°.	3°.
Coséc Z.....	1,000	1,154	2,000	2,92	5,76	7,19	9,57	14,3	19,1
1 tour.....	1 ^s ,000	1 ^s ,154	1 ^s ,957	2 ^s ,85	5 ^s ,59	6 ^s ,95	9 ^s ,16	14 ^s ,0	19 ^s ,4

Si l'on rapporte ces valeurs au premier vertical en les multipliant par $\sin Z$, on trouve comme valeurs extrêmes : $0^s,96$ pour $Z = 6^\circ$ et $1^s,02$ pour $Z = 3^\circ$, l'écart maximum par rapport à la moyenne étant de 3 % en plus ou en moins. Mais si l'on répète plusieurs fois ces mesures, on obtient toujours les mêmes résultats pour chaque azimut : le variateur est donc fidèle; d'autre part, il ne donne jamais lieu au moindre glissement. Le guidage ne présente aucune difficulté, même si la vitesse propre du micromètre diffère de 2 à 3 % de la vitesse calculée.

Le variateur de vitesse de l'astrolabe O. P. L. sera construit selon le même principe, mais avec un disque de plus grand diamètre. Comme on serait conduit à accroître démesurément le diamètre de la came circulaire, le système coulisse-came sera remplacé par un engrenage de La Hire. On emploiera un galet entièrement métallique, parce que le micromètre a été conçu en vue de réduire considérablement les résistances passives, une adhérence suffisante pouvant alors être obtenue sans l'aide d'une jante en caoutchouc. On peut prévoir que la vitesse réalisée ne s'écartera pratiquement pas de la vitesse calculée.

Deux dispositifs de rappel, permettant à l'observateur de corriger le mouvement de la vis et de maintenir en coïncidence les deux images dans le champ de la lunette, ont été successivement employés. Le premier a dû être abandonné parce qu'il comprenait plusieurs trains d'engrenages dont le temps perdu était excessif; il fallait donc que la vitesse du moteur soit assez différente de la vitesse calculée pour que le différentiel agisse toujours dans le même sens. Dans ces conditions, l'observation des étoiles faibles était incertaine, un écart de guidage tendant à s'aggraver si la réaction de l'observateur n'était pas instantanée.

Le dispositif actuellement en service, conçu par M. Jean Texereau et réalisé avec un soin particulier à l'atelier de l'Observatoire est pratiquement parfait. Il sera utilisé dans l'astrolabe O. P. L. On peut voir, sur la planche IV, le moteur protégé par son carter, et la tige qui transmet le mouvement à l'instrument. A sa partie supérieure, cette tige est reliée par un joint de Cardan à l'axe du différentiel. Trois trains épicycloïdaux plans sont disposés à 120° les uns des autres autour de cet axe, disposition destinée à assurer une bonne répartition des efforts. Tous les axes sont montés sur billes. La boîte cylindrique qui renferme les rouages du différentiel porte extérieurement une denture, en prise avec la denture d'une couronne circulaire qui entoure la cloche, et qu'on peut actionner à l'aide d'un volant de 52 cm de diamètre. Pendant l'observation, l'observateur tient ce volant à deux mains, et il s'en sert pour maintenir la coïncidence des images. Un tour du différentiel correspond à 4,3 tours de la vis micrométrique, c'est-à-dire à $42''$. Pour déplacer les composantes l'une par rapport à l'autre de $6'',7$ (c'est approximativement le diamètre vertical de l'image de diffraction d'une étoile brillante), il faut faire

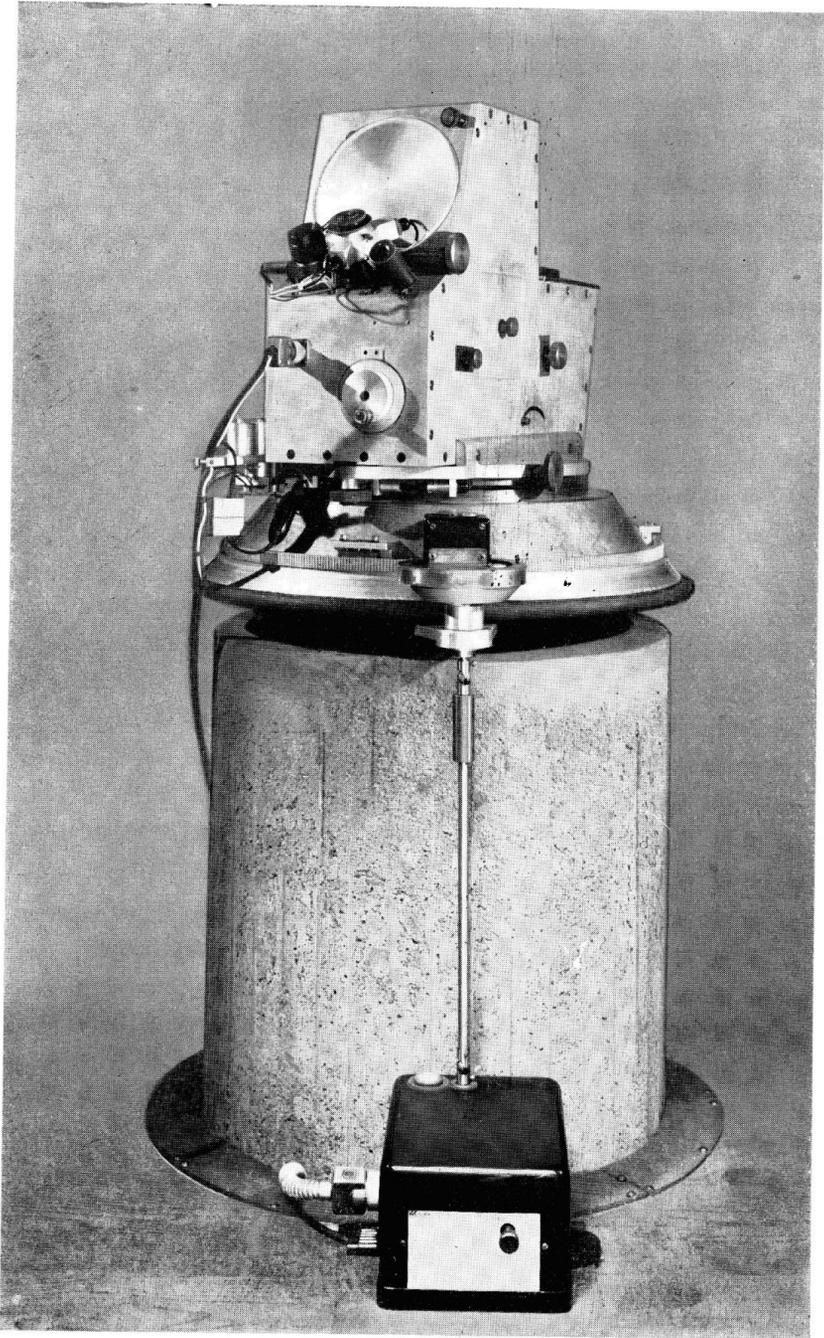


Planche IV. — Vue d'ensemble de l'astrolabe.
Au pied du pilier, le moteur d'entraînement.

tourner le volant du différentiel de 57° , l'étoile étant dans le premier vertical. Ce mécanisme est donc très sensible. D'autre part, le sens dans lequel il faut mouvoir le volant pour faire monter ou descendre l'une des images ne dépend pas de l'azimut de l'étoile : il faut toujours le pousser vers la droite pour faire redescendre celle des composantes qui montait dans le champ avant l'embrayage. La simplicité de cette règle rend instinctive son application.

Le moteur de l'astrolabe O. P. L. sera placé dans un évidement ménagé au centre du pilier. La tige motrice sera logée elle aussi dans ce pilier, ce qui permettra de placer la boîte du différentiel à l'intérieur de la cloche et de dégager complètement les abords de l'appareil ; mais la disposition du volant sera conservée, conformément au désir exprimé par tous les observateurs qui en apprécient la commodité.

Le bain de mercure. — Le récipient du bain de mercure est constitué par un disque de cuivre rouge électrolytique de 130 mm de diamètre et de 8 mm d'épaisseur, dans lequel on a creusé au tour une cuvette de 1,1 mm de profondeur, dont le fond plat, de 83 mm de diamètre, se prolonge jusqu'au bord par une surface tronc-conique de faible pente ⁽¹²⁾. Une gorge a été creusée dans la partie cylindrique extérieure du disque, puis, pour éviter la fuite du mercure par capillarité, on a recouvert cette partie, ainsi que la face inférieure du disque, d'une épaisse couche de vernis. Aussitôt après, et sans attendre que la surface de la cuvette ait été altérée par oxydation ou par le contact de corps gras, on l'a soigneusement amalgamée à l'aide d'une solution de nitrate mercureux préparée en laissant séjourner pendant quelques heures un globule de mercure dans une solution diluée d'acide nitrique pur. Après rinçage, la surface a été rapidement séchée à l'air chaud, puis une glace plane, doucie, a été appliquée sur son bord jusqu'au moment de l'observation, pour la préserver de l'air et des poussières. Sitôt après la fin d'une séance, on videra la cuvette en versant son contenu dans une cuve large et profonde et l'on remettra en place la glace protectrice.

Pour utiliser le bain ainsi préparé, on le découvre, on le place au-dessus de la cuve en l'inclinant fortement, et l'on fait ruisseler du mercure pur sur sa surface. La pellicule jaune qui la recouvre est déchirée et entraînée, ainsi que les poussières qui pourraient la souiller. On met en place la cuvette sur la plate-forme de l'astrolabe, puis on y dépose, à l'aide d'une pipette, la quantité de mercure pur nécessaire pour former une couche de 0,9 à 1 mm d'épaisseur environ. La pipette doit avoir la forme d'une sphère portant à sa partie inférieure un bec capillaire de quelques

(12) J. V. GARWICK, *Sur la surface d'un bain de mercure* (*Bull. Astron.*, t. 14, 1949, p. 145).

millimètres de longueur; on plonge rapidement son bulbe dans un vase renfermant du mercure pur que l'on aspire à l'aide d'un tube de caoutchouc adapté au tube de la pipette, et suffisamment long pour qu'on puisse, en l'enroulant, former une ou deux spires. Ainsi, l'opérateur ne court pas le risque d'avaler les gouttelettes de mercure qui pourraient se trouver entraînées. En puisant le mercure dans la partie inférieure du vase, on obtient un liquide sec, propre, dont la surface est parfaitement nette ⁽¹³⁾.

Le mercure usagé ne peut servir de nouveau sans être filtré. L'appareil à filtration représenté ci-contre est d'un emploi facile et sûr (*fig. 13*).

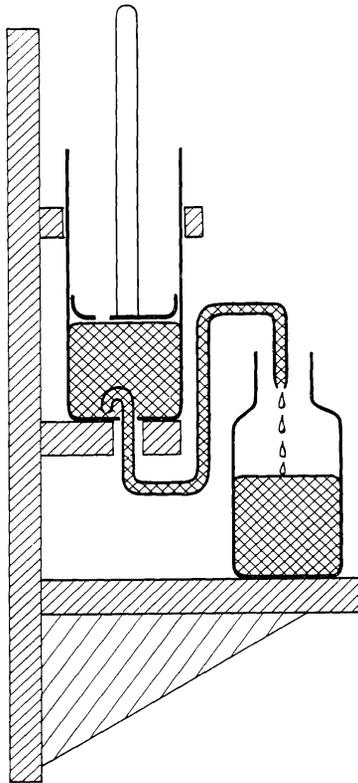


Fig. 13. — Appareil à filtration du mercure.

On l'amorce avec du mercure du commerce, et l'on peut s'en servir tous les soirs pendant un ou deux ans sans qu'il soit nécessaire de le nettoyer. Lorsque la croûte d'oxyde souillée de corps étrangers qui reste dans le filtre est sur le point d'être entraînée, on régénère le mercure par un lavage au nitrate mercureux, on lave le filtre avec le même bain, on le sèche, et on l'amorce avec du mercure neuf.

⁽¹³⁾ Il faut bien se garder de passer une baguette de verre à la surface du mercure. Elle y déposerait les poussières qu'elle aurait récoltées par attraction électrostatique.

Certains observateurs croient qu'il suffit de verser du mercure n'importe comment, en n'importe quelle quantité, dans un récipient quelconque, pour obtenir une surface réfléchissante ayant les propriétés optiques d'un miroir plan. En fait, *on ne réalise une telle surface qu'au prix de grandes précautions trop souvent négligées*. On ne peut éviter la propagation d'ondes à la surface du bain que si l'angle de raccordement de cette surface et de la surface du récipient est faible, et si l'épaisseur du liquide au centre ne dépasse guère 1 mm; la première de ces deux conditions impose le choix du cuivre rouge, ce métal étant bien mouillé par le mercure, dans lequel il est cependant peu soluble comme le montre l'excellente conservation de nos bains. Dans une cuve de laiton ou de bronze, le mercure se transforme bientôt en une boue noirâtre; il ne mouille ni le fer, ni l'acier. Il faut, en outre, que la ligne de raccordement se forme sur une surface très propre. S'il s'y trouvait des empreintes digitales ou des dépôts solides non mouillés, la surface du mercure serait alors convexe près de ces régions souillées, et sa déformation s'étendrait à plusieurs centimètres alentour. De telles déformations s'observent aisément par la méthode de la lame de couteau (Foucault), en pointant une lunette autocollimatrice sur un bain de mercure négligemment préparé; les poussières y marquent des dépressions, ainsi que les voiles d'oxyde qui en altèrent les propriétés capillaires. Il n'est pas moins nécessaire que le fond de la cuvette soit bien mouillé, car, sans une parfaite adhérence du mercure au disque de cuivre, on ne peut répondre de l'uniformité de sa température. Les deux métaux sont tous les deux de bons conducteurs, et l'on peut admettre que, grâce à sa capacité calorifique, le disque de cuivre constitue un support isotherme, avec lequel une mince couche de mercure se met rapidement en équilibre. Il n'en serait plus de même si un matelas isolant séparait les deux corps.

Il convient de soustraire le bain de mercure de l'astrolabe au souffle du vent en le protégeant par une boîte, dont la face supérieure est percée de deux ouvertures donnant passage à la lumière de l'étoile. Lorsqu'on dépointe l'astrolabe pour passer d'une étoile à une autre, la surface du mercure se déforme. On doit opérer sans brusquerie, sous peine de faire jaillir le mercure hors de la cuvette. Pendant l'observation, on n'a jamais constaté de vibrations sous l'effet du mécanisme d'entraînement, ni de la manipulation des diverses commandes, mais, quand on règle l'astrolabe en hauteur, l'image réfléchie sur le bain s'agite et se déforme au point de disparaître pendant un instant si l'étoile est faible. Elle reparait dès qu'on cesse d'agir sur l'instrument, et en 2 ou 3 s, elle a repris son aspect normal. Un effet curieux, et qui surprend tout observateur non prévenu, montre bien que le mercure, en couche mince au repos, dans une cuvette mouillée, se comporte comme un corps rigide : quand on commence le réglage, les deux images se déplacent pendant un court instant en sens

inverses, sans se déformer; puis on voit l'image réfléchie s'agiter et elle commence alors à rebrousser chemin. Tout se passe comme si le mercure suivait d'abord le mouvement de son support à la manière d'un corps solide, avant d'obéir à la pesanteur et de tendre vers une nouvelle position d'équilibre. Quelques secondes se trouvent ainsi perdues à chaque réglage; il y aurait donc avantage à faire reposer le bain de mercure non sur le corps de l'astrolabe lui-même, mais sur un support solidaire du plateau P. Une expérience en cours montrera si, dans ces conditions, le bain de mercure se trouve aussi bien protégé des vibrations qu'il l'est actuellement ⁽¹⁴⁾.

Mise en station, conduite des observations. — On vérifie d'abord la position du galet sur son axe en enregistrant le mouvement de la vis pour deux positions opposées de l'appareil, par exemple, pour les lectures 90° et 270° . On fait coulisser le galet sur son axe jusqu'à ce qu'on obtienne la même valeur du tour de vis dans ces deux directions, puis on le fixe. On vérifie ensuite l'orientation de la came circulaire qui régit la position du disque. Si elle est correctement placée, on trouve le même tour de vis dans deux azimuts supplémentaires, par exemple 10° et 170° . Le réglage peut porter soit sur la came, soit sur le cercle de calage si l'on peut en déplacer le zéro. Enfin, on oriente la cloche sur son pilier, en visant des étoiles très brillantes. On se sert des mêmes étoiles pour dégrossir les réglages du prisme; pour n'avoir pas à refaire chaque soir cette dernière opération, on a soin de munir la monture du prisme de deux butées grâce auxquelles elle se replace automatiquement dans une position invariable.

On oriente les fils verticaux du réticule en visant une étoile voisine du maximum de disgression, c'est-à-dire à mouvement azimutal très lent. Pendant cette opération, on laisse le micromètre immobile au voisinage de ν_0 . Dès que les deux images pénètrent dans le champ, on les amène sur le même fil vertical en agissant sur l'horizontalité des arêtes du prisme et sur l'azimut de l'appareil. Si le fil est vertical, on voit les deux images s'en écarter progressivement, pour venir en coïncidence; sinon elles passent à côté l'une de l'autre, sans coïncider.

On oriente ensuite le plan de dédoublement du wollaston, qui doit être vertical, en le rendant parallèle aux fils verticaux du réticule. On se sert pour cela de l'oculaire à autocollimation et d'un miroir plan dont la monture peut se substituer à celle du prisme. Lorsqu'on agit sur le micromètre, les deux images des fils verticaux doivent glisser l'une sur l'autre. Si un dédoublement latéral apparaît quand le dédoublement vertical est important, il faut faire tourner le wollaston dans sa monture jusqu'à ce

⁽¹⁴⁾ L'expérience a décidé en faveur de la nouvelle disposition qui sera réalisée dans le modèle O. P. L. (Note ajoutée sur les épreuves.)

que l'on obtienne la superposition des images du fil vertical. Ce réglage, comme le précédent, se montre stable; il peut être fait une fois pour toutes.

Au début d'une séance d'observation, on met en place l'oculaire à autocollimation ainsi que le miroir plan (en silice fondue) dont il vient d'être question. En agissant sur le micromètre, on fait coïncider les deux images de chacun des fils horizontaux, et on lit le tambour de la vis, ce qui donne v_0 ; on a déterminé v_m une fois pour toutes (cette lecture n'ayant pas varié au cours de plusieurs années d'observation) en notant la fermeture et l'ouverture du contact du micromètre. On note en outre la température et la pression. Puis on met en place le prisme et le bain de mercure. En utilisant l'oculaire à autocollimation, on oriente la face de sortie du prisme normalement à l'axe optique de l'instrument. Ceci fait, on substitue l'oculaire de Ramsden à l'oculaire à autocollimation, et l'instrument est prêt pour l'observation. En général, lorsque les deux images d'une étoile apparaissent dans le champ, elles ne sont pas disposées symétriquement par rapport aux fils horizontaux. Il y a donc lieu d'agir d'une part, sur l'inclinaison des arêtes du prisme, d'autre part sur la hauteur de l'instrument. On retouche peu à peu ces réglages, à mesure que les deux images se rapprochent, et que l'observateur juge mieux de leur position relative.

Quand elles se trouvent à la même hauteur, on abaisse la commande de la came d'embrayage. Les deux images cessent alors de se mouvoir en hauteur; mais elles se meuvent lentement entre les fils horizontaux; en agissant sur le différentiel, on les maintient aussi exactement que possible à la même hauteur, tant que le signal sonore n'a pas annoncé la fin de l'enregistrement. Le temps du passage doit être corrigé pour tenir compte de la différence entre l'azimut de l'instrument et celui de l'étoile au moment de la coïncidence vraie. Il faut donc estimer la position qu'occupait le couple dans le champ au milieu de l'enregistrement; c'est à quoi servent les fils verticaux du réticule. Du reste, un observateur quelque peu expérimenté s'arrange pour placer le couple, au commencement de l'observation, à une distance du centre telle que la correction soit négligeable (*voir* le Mémoire de B. Guinot, p. 293).

L'enregistrement achevé, l'observateur relève le galet. Il peut alors passer à une autre étoile. Après la dernière observation de la série, il remet en place l'oculaire à autocollimation, et il s'assure que la face arrière du prisme est encore perpendiculaire à l'axe optique de l'instrument. En règle générale, il en est bien ainsi; dans le cas contraire, il faudrait admettre que l'instrument a reçu un choc à l'insu de l'observateur, et la série de mesures devrait être tenue pour suspecte. Après cet indispensable contrôle, on substitue le miroir plan au prisme, et l'on détermine une seconde fois v_0 , ainsi que la température et la pression. Si la distance zénithale vraie d'observation a varié dans l'intervalle,

il est tenu compte de ce changement, toujours faible, dans la réduction des observations.

Variation thermique de ν_0 . — Les premières observations avaient mis en évidence une variation systématique de ν_0 avec la température t ; l'ensemble des déterminations ultérieures a confirmé l'existence de cette variation. De 0 à 30°C , ν_0 est une fonction linéaire bien déterminée de t , à la condition que les mesures soient faites sur l'instrument en équilibre de température. En régime variable, par exemple au cours d'une journée ensoleillée suivie d'une nuit claire, la courbe représentant la variation de ν_0 en fonction du temps reproduit la courbe de la température extérieure, mais avec un retard de quelques heures. L'instrument se comporte donc comme un thermomètre fidèle mais de grande inertie.

Des déterminations systématiques faites au cours de quelques journées froides, d'abord au voisinage de 0° , puis en élevant la température de la pièce à 30° à l'aide de radiateurs électriques, ont montré que, dans cet intervalle, ν_0 variait de $2,42$ centièmes de tour par degré Celsius, le déplacement correspondant du plan focal étant de $36,3 \mu$; ce plan se rapproche de l'objectif quand la température croît. Rapportée à la distance focale elle-même, la variation relative atteint $-52 \cdot 10^{-6}$.

Une partie de cet effet est imputable à la dilatation de la caisse de l'astrolabe, dont les parois ont été découpées dans une même planche d'aluminium pur. Pour déterminer le coefficient de dilatation du métal, on a prélevé sur cette planche deux éprouvettes, l'une, parallèle au sens de l'étirage, l'autre dans le sens perpendiculaire. On a trouvé dans les deux cas $23 \cdot 10^{-6}$; le métal est donc bien homogène et la caisse se dilate par homothétie.

Il restait à expliquer le surplus de la variation, s'élevant à $29 \cdot 10^{-6}$ par degré. M. Jean Texereau avait déjà entrepris l'étude des variations thermiques d'un aplanat de 12 cm d'ouverture et de 100 cm de distance focale, du même type que celui de l'astrolabe; il déterminait la position du plan focal par la méthode de Foucault, le support de la lame de couteau étant relié à celui de l'objectif par trois fortes tiges d'invar. La distance d'intersection fut trouvée pratiquement indépendante de la température. On avait déjà tiré la même conclusion de calculs faits à l'aide des rares données que l'on possède sur la dilatation des verres usuels et la variation thermique de leurs indices. D'autre part, on ne pouvait supposer que les miroirs en silice fondue, parvenus à l'équilibre de température, n'avaient pas la même courbure à 0° et à 30° .

La variation thermique de ν_0 est donc restée en grande partie inexpiquée jusqu'au jour où l'on s'est décidé à retirer l'objectif de l'astrolabe et à l'étudier sur le banc d'essai à tiges d'invar. M. Texereau a alors trouvé une contraction de la distance focale de $-33 \cdot 10^{-6}$ par degré, valeur

bien différente de celle que l'objectif de 12 cm lui avait donnée, et qui était presque nulle. Les verres dans lesquels on a taillé l'objectif de l'astrolabe n'avaient probablement pas été assez finement recuits. Cette leçon ne sera pas perdue; dans l'avenir, un contrôle strict sera exercé sur la qualité des verres utilisés. D'autre part, on substituera la fonte à l'aluminium dans la construction de la caisse de l'instrument. Grâce à ces précautions, le coefficient thermique pourra être réduit au huitième de sa valeur actuelle.

On notera que la somme des coefficients trouvés séparément pour l'aluminium et pour la distance focale excède de $4 \cdot 10^{-6}$ l'effet global mesuré directement par la variation de ν_0 . Il se peut qu'une troisième cause intervienne, mais elle se traduit par un phénomène d'amplitude trop faible pour qu'on puisse en découvrir l'origine.

Autant qu'on peut en juger, le prisme n'est le siège d'aucun effet thermique nuisible. Une différence de température entre le verre et l'air ambiant ne peut entraîner une déviation sensible des faisceaux lumineux, puisque leur incidence est normale. D'autre part, les variations de l'angle du prisme sont trop faibles pour ressortir de la discussion des écarts des observations.

Au cours de la présente étude, on a décrit, sans en omettre aucun, tous les défauts du nouvel astrolabe révélés par une pratique de plusieurs années, non, certes, pour déprécier cet instrument, mais pour persuader le lecteur qu'aucun point n'a été laissé dans l'ombre, et que rien ne sera négligé pour réaliser un instrument définitif aussi voisin que possible de la perfection. On ne sera pas surpris qu'un prototype dont la disposition était entièrement nouvelle ait présenté d'abord quelques imperfections. On a pu faire disparaître certaines d'entre elles, tandis que les autres, inhérentes à la construction du prototype, eussent nécessité sa refonte complète. Mais elles ont été portées à la connaissance de la société *Optique et Précision de Levallois*, et on ne les rencontrera plus dans le modèle définitif.

Installation de l'astrolabe de 6 cm; organisation du service. — L'astrolabe de l'Observatoire de Paris a été installé dans un pavillon en bois, de 2,3 sur 4 m, et de 2 m de hauteur. La partie du toit qui surmonte l'appareil est tournante; une trémie de 25 sur 35 cm a été pratiquée à sa périphérie; on place cette ouverture en regard de l'instrument avant chaque passage, en s'aidant d'une graduation en azimut tracée sur la tourelle qui porte le toit tournant. Un ventilateur, installé dans l'une des parois du pavillon, maintient une légère dépression dans la salle, obligeant ainsi l'air extérieur à pénétrer par l'ouverture. C'est la manière la plus efficace de lutter contre l'agitation des images due au mouvement ascendant de l'air chaud qui tendrait à s'échapper en passant par la trémie.

Pendant la période des tâtonnements et des essais, et jusqu'à l'époque où je me suis adjoint M. B. Guinot, toutes les observations ont été faites par moi-même, et réduites par M. L. Arbey. Dans la suite, M. B. Guinot a pris une part de plus en plus active aux observations et aux calculs de réduction. Après la mise en place du nouveau différentiel, au milieu de l'année 1953, il a paru impossible d'améliorer davantage l'appareil existant, et j'ai décidé de le laisser dorénavant en service continu. Le service complet d'observations organisé dès le mois d'octobre 1953 comprend actuellement (décembre 1954) quatre observateurs : MM. L. Arbey, B. Guinot, J. Kovalevsky, M^{lle} Débarbat. Chacun d'eux réduit ses propres observations, avec, éventuellement, le concours de calculatrices.

J'ai demandé à M. B. Guinot, qui a déjà exposé ici ⁽¹⁵⁾ une méthode rapide de résolution du problème des hauteurs égales par la méthode des moindres carrés, de compléter cet exposé par celui des calculs de réduction et par la discussion des résultats fournis par le nouvel astrolabe.

(15) *Bull. Astron.*, t. 18, 1954, p. 73.

(Manuscrit reçu le 7 janvier 1955).

