

PUBLIKACE PRAŽSKÉ STÁTNÍ HVĚZDÁRNY.

No 1.

PUBLICATIONS DE L'OBSERVATOIRE NATIONAL DE PRAGUE.

433

TROISIÈME ETUDE
SUR L'APPAREIL CIRCUMZÉNITHAL

NUŠL-FRIČ.

IÈRE PARTIE

SUR LE PRINCIPE ET SUR LES DÉVELOPPEMENTS
POSSIBLES DE L'APPAREIL.

PAR

FR. NUŠL.

1925.

IMPRIMERIE DE JEDNOTA ČESKOSLOVENSKÝCH MATEMATIKŮ A FYSIKŮ
A PRAGUE.

I.

Les frères Joseph et Jean Frič exposèrent en 1891, dans la section pour la mécanique de précision de l'Exposition nationale à Prague, un grand et long bloc de granite, qui attirait beaucoup l'attention du public. Cette pièce fixée horizontalement sur ses deux extrémités, actionnait par sa partie centrale un mécanisme de leviers qui, par une aiguille-indicateur montrait, sous un fort grossissement les flexions du bloc. Chaque visiteur de l'Exposition pouvait ainsi s'assurer que le rocher fléchit même sous la faible pression d'un doigt.

C'est cette expérience qui m'a été rappelée par le constructeur Frič, quand quelque temps après je lui demandai de me construire un axe en acier ayant les deux extrémités parfaitement cylindriques ; je voulais construire un instrument méridien, fonctionnant sans niveau, mais avec un bain de mercure. M. Frič me répondit que la chose lui était impossible ainsi que pour tout autre mécanicien. Il me fit remarquer, que même s'il réussissait, le futur instrument serait soumis à des flexions qui elles-mêmes seraient variables. Il ajouta que le balcon, où je voulais installer mon instrument aurait, lui aussi des flexions suivant les déplacements de l'observateur, tout comme le bloc de granite de l'Exposition.

Cette douche, administrée par un mécanicien expérimenté, excita au plus haut degré mon désir de surmonter les obstacles signalés. A cette époque j'étais professeur au Lycée de Hradec Králové, où je faisais avec mon collègue le professeur. B. Mašek des observations astronomiques à l'aide d'un excellent sextant, construit par Negretti et Zambra à Londres. Je me disais toujours: Voilà un instrument parfait qui n'exige aucun support fixe. Quand on observe

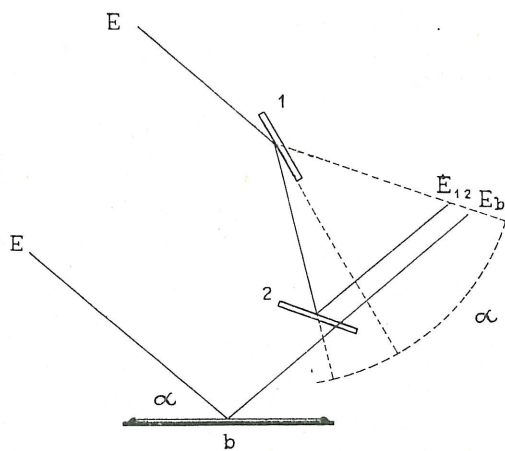


Fig. 1.

dans une hauteur constante, les flexions sont identiques. Et si même le balcon avait des flexions, la surface d'un bain de mercure en est exempte. Après maintes réflexions j'acquis enfin l'assurance qu'il serait possible de construire un instrument nouveau.

Voici mes considérations: D'après la figure 1. si l'un de deux miroirs No 1. ou 2. tourne, dans le même sens, d'un angle $+\varepsilon$, la direction du rayon deux fois réfléchi se trouve changée dans le premier cas d'un angle -2ε et dans le second de $+2\varepsilon$. Il s'en suit que, si nous tournons l'ensemble de ces deux miroirs, c'est à dire le sextant lui même, autour de la ligne d'intersection des plans des miroirs d'un angle quelconque, les rayons E_{12} et E_b , parallèles avant la rotation, le restent après.

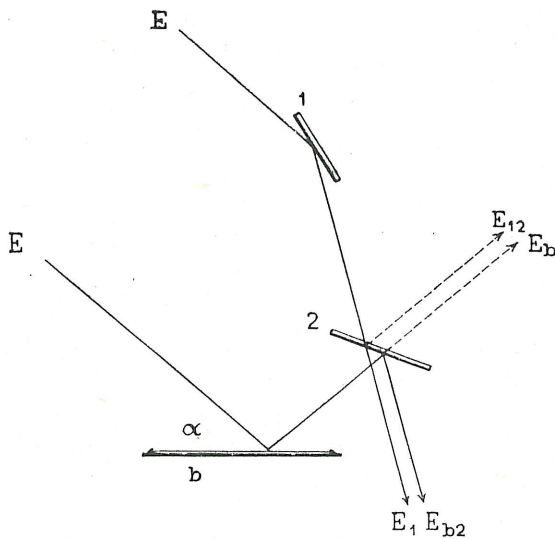


Fig. 2.

Sur la figure 2. nous trouvons outre le parcours fondamental des rayons lumineux du sextant, une autre coïncidence des rayons réfléchis, qui y est indiquée par les lettres E_{b2} , E_1 . Cette coïncidence est équivalente à la coïncidence originale, ce qui nous donne une nouvelle possibilité d'observation. Nous pouvons remplacer les miroirs par les plans argentés 1. et 2. d'un prisme, qui est dessiné sur la figure 3. et dont l'angle est égal à $180 - \alpha$, α étant l'angle des miroirs du sextant. Si ce prisme tourne autour de la ligne d'intersection des plans 1. et 2., les rayons réfléchis E_1 et E_{b2} tournent tous deux d'un angle double et restent en coïncidence. Et si le prisme tourne jusqu'à la position symétrique indiquée sur la figure 4., les rayons réfléchis deviennent horizontaux et le parcours caractéristique des rayons lumineux dans l'appareil circumzénithal est trouvé. Au mois de décembre 1899 lors de ma première improvisation de l'instrument, j'ai employé un prisme à angle de 60° n'en ayant pas à ma disposition un autre plus convenable. Le parcours des rayons est indiqué sur la figure 5.

Au mois de mai en 1900 l'Académie des Sciences de Bohême me fit remettre une subvention pour l'achat du prisme approprié. Et c'est grâce à cela et surtout à la collaboration précieuse et constante de M. Frič que je pus songer à la construction mécanique parfaite de l'instrument. M. Frič n'a regretté ni le temps ni l'argent et déjà l'année suivante en 1901 le premier modèle de l'appareil circumzénithal a pu être achevé.

Au mois de mai de la même année, j'avais publié, dans l'Académie des Sciences le principe de l'appareil, sa théorie et celle de sa rectification, ainsi

que le calcul de quelques séries d'observations faites au mois de juin 1900, avec l'appareil improvisé.¹⁾ Mais ce ne fut qu'à la fin de 1901, après ma nomination de professeur à Prague, que, chargé d'écrire le rapport sur le progrès de l'astronomie pour le Věstník de l'Académie, je trouvai dans le numéro de Janvier 1900 du Bulletin Astronomique sous un titre modeste l'excellent article de M. Claude „Sur l'emploi d'un prisme à réflexion dans

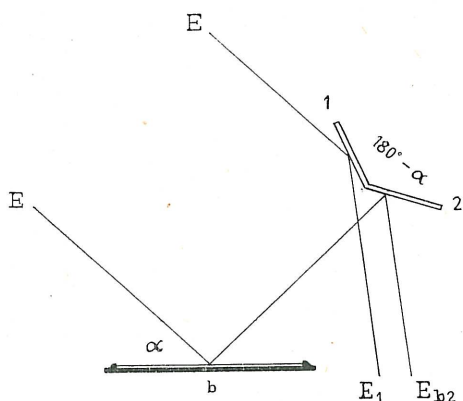


Fig. 3.

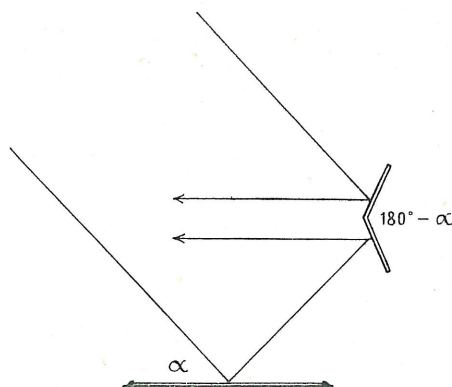


Fig. 4.

les lunettes.“ J'y constatai que déjà au mois d'août de 1899 M. Claude avait fait des observations avec un appareil à prisme, semblable au sextant, appareil nommé plus tard l'astrolabe à prisme. Il avait aussi employé un prisme à angle de 60° , mais avec des réflexions à l'intérieur, comme le montre la figure 6.

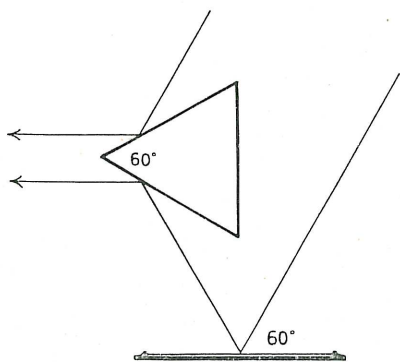


Fig. 5.

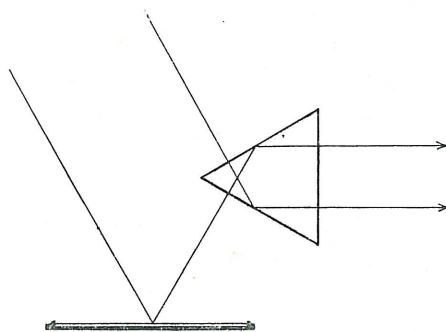


Fig. 6.

Plus tard, quand je reçus le livre très détaillé de M. M. Claude-Driencourt: „Description et Usage de l'Astrolabe à prisme, Paris 1910,“ je lus dans l'introduction, page XXIX, que M. le Dr. A. Beck avait déjà indiqué le principe de l'Astrolabe à prisme dans les Astronomische Nachrichten 1892

¹⁾ „Rozpravy“ de l'Académie des Sciences de Bohême Prague 1901 No 20.

No 3102. J'avais lu un mémoire important de M. le Dr. Beck dans les *Astronomische Nachrichten* 1903, No 3803, parce que M. le professeur E. Hammer en avait fait mention dans son rapport sur l'astrolabe à prisme et sur le circumzénithal. Mais les instruments décrits dans ce mémoire, contenant, sans exception, des niveaux et les mesures étant faites et corrigées à l'aide de l'autocollimation d'une lunette verticale dans un bain de mercure, cette solution avait peu d'intérêt pour moi et je ne lus plus les travaux antérieurs de M. Beck. Mais, mon attention attirée par la remarque faite par M. M. Claude et Driencourt, je trouvai l'ancien article de M. Beck dans les *Astronomische Nachrichten*, et j'y vis, que cet astronome a découvert en 1892 non seulement le principe de l'astrolabe à prisme, mais encore celui de l'appareil circumzénithal. Je suis très heureux de pouvoir, au moins maintenant, faire mention ici de l'évolution exacte du principe de ces appareils à hauteur égale, ainsi que l'ont fait M. Claude et Driencourt en 1910. Ce qui est intéressant et surprenant à constater, c'est que M. Beck n'a jamais appliqué ce principe dans la construction de ses appareils de hauteur égale. Peut-être avait-il plus de confiance dans les indications données par des niveaux qu'en celles données par le bain de mercure, ou espérait-il augmenter la précision de ses observations en multipliant le nombre des fils dans l'oculaire de son appareil. En réalité son „Nadirinstrument“ construit par la maison Breithaupt à Cassel est muni de 13 fils et son instrument plus grand encore, construit par Heyde à Dresde en a 20.

L'appareil circumzénithal et l'astrolabe permettent aussi l'emploi des fils dans le champ de l'oculaire, comme l'a fait M. Trümpler.²⁾ Mais cette solution détruit le principal avantage de ces deux instruments, qui consiste en ce que l'instant de coïncidence est parfaitement indépendant de tous les petits changements, soit de l'inclinaison de la lunette, soit de celle du prisme ou de tous deux. L'astrolabe à prisme ne donne, pour chaque étoile observée, qu'un seul instant de coïncidence. La précision des observations n'est augmentée que par l'observation de plusieurs étoiles, circonstance qui rend le calcul des réductions assez pénible. Au contraire, déjà dans la première improvisation du circumzénithal en 1900, j'ai placé un mince prisme devant l'objectif qui me permettait d'observer plusieurs instants de coïncidence des couples d'images au lieu d'un passage unique. Dans le premier modèle du circumzénithal, construit par M. Frič en 1901, nous avons même triplé les images, de sorte que nous pouvions observer 13 instants de passage pour chaque étoile. Ce dispositif diminuait évidemment la luminosité des images, mais nous n'avons eu aucune difficulté quand nous nous bornions aux étoiles fondamentales, au-dessus de 4,3 de grandeur.

Pendant les vacances de 1901, les premières observations systématiques, faites dans l'observatoire privé de M. Frič à Ondřejov près de Prague, ont réussi. Les réductions nécessaires, faites après les vacances, nous ont montré

²⁾ *Göttinger Nachrichten* Math. phys. Classe 1913. page 375.

³⁾ *Bulletin international de l'Académie des Sciences de Bohême* Prague 1903. No 21. pag. 8.—10. (Nušl-Frič Première Etude sur l'app. circumzénithal.)

que toutes les observations avaient été affectées de sérieuses irrégularités dans la hauteur apparente. Nous trouvâmes bientôt la cause de cet insuccès, c'étaient les dimensions insuffisantes du bain de mercure.

En réalité nous avons démontré par un calcul spécial,³⁾ que le plan horizontal du bain de mercure n'est atteint avec une précision suffisante, qu'à une assez grande distance du bord. Voici le résultat de ce calcul, fait sous l'hypothèse d'un bord élevé au maximum de 0.5 mm au-dessus du niveau.

Distance du bord en mm	L'angle de la normale avec la verticale
6	1°
12	1000''
23	100
35	10
46	1
58	0,1
69	0,01
80	0,001

Il en résulte alors, que la partie centrale dans une étendue de 60 mm à peu près d'un bain de mercure ayant 200 mm de diamètre, sera parfaitement horizontale dans les limites de $\pm 0'',01$.

En 1902 déjà nous avons travaillé avec un instrument reconstruit, dont le bain de mercure mesurait 20 cm de diamètre. Mais les séries d'observations quoique chacune d'elles ait été bien en accord, présentaient cependant entre elles des irrégularités de hauteur, atteignant même $\pm 3''$. Il était impossible d'en chercher l'explication dans les variations de la réfraction. Mais comme nous l'avons expliqué minutieusement dans notre Première Etude de l'appareil circumzénithal en 1903, pag. 50.—55. la cause était d'ordre fondamental. Les défauts dans la hauteur doivent leur origine à la mise au point variable de l'oculaire, si les images sont formées par deux faisceaux de rayons lumineux réfléchis par le prisme: l'un supérieur et l'autre inférieur. Nous avons constaté, que même la variation de la température de quelques degrés causait un changement de la mise au point, qui se manifestait dans la hauteur par une variation de quelques secondes d'arc.

Nous avons prouvé dans la même publication, qu'on peut facilement supprimer ce défaut de l'appareil, en divisant les rayons en deux moitiés par un plan vertical, celle de gauche et celle de droite, car c'est par cette répartition de la lumière, que l'instant de la coïncidence devient tout à fait indépendant de la mise au point. Et ce fut pourquoi nous avons abandonné le prisme dans le deuxième modèle de notre appareil circumzénithal, pour le remplacer par deux miroirs croisés du sextant, placés côte à côte.

Cette modification de l'appareil fut véritablement un grand succès comme le prouve notre Deuxième Etude de l'appareil circumzénithal 1906⁴⁾ et comme j'aurai encore l'occasion de le démontrer dans ce mémoire.

⁴⁾ Bulletin international de l'Académie des Sciences de Bohême Prague 1906.

Après l'armistice et le Coup d'Etat, quand notre Institut géographique de l'Armée fut organisé et qu'il fut possible d'entreprendre des travaux géodésiques, le chef du Service astronomique et géodésique du dit Institut, M. L. Beneš, demanda à M. Frič un appareil circumzénithal pour les mesures du réseau géodésique. Alors nous basant sur toutes nos expériences acquises, nous prîmes le parti d'entreprendre la construction d'un troisième modèle de l'appareil. C'est ce qui a été fait en 1922 et M. Frič dans le No. 2. des Publications de l'Observatoire national de Prague donne la description détaillée du nouvel appareil, ainsi que de toutes ses parties importantes. Je me bornerai ici à un bref exposé des considérations qui furent décisives pour la nouvelle construction

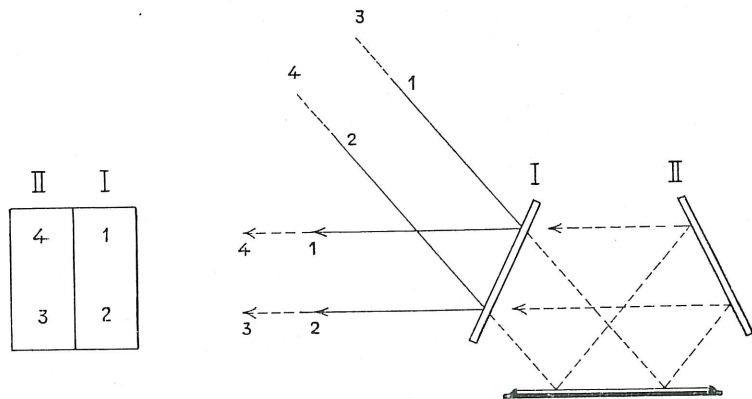


Fig. 7.

Afin de diminuer autant que possible les erreurs accidentelles nous avons conservé de la construction précédente, tout ce qui permettait d'observer pour chaque étoile 6 ou 7 instants de coïncidence. C'est pourquoi nous avons divisé les images par deux prismes minces, placés devant l'objectif, en deux couples inégaux, distants respectivement de 50" et 90". En plus nous avons mis devant la pleine ouverture de l'objectif un prisme achromatique réversible pour pouvoir observer trois fois les 6 ou 7 instants de passage, soit : dans la hauteur normale sans ce prisme, soit encore deux fois, dans la hauteur diminuée ou augmentée par le prisme d'une valeur constante de 6'.

Pour les étoiles horaires à l'est ou à l'ouest, nous obtenons ainsi 18 ou 21 instants de chaque passage, dans approximativement l'intervalle de 2 minutes. Une détermination complète de l'heure, comportant l'observation d'une étoile à l'est et d'une à l'ouest, dure alors moins que 10 minutes, en choisissant convenablement la paire d'étoiles. Dans ce cas, en préparant à l'avance une petite table pour chaque étoile, le calcul des réductions lui-même peut être achevé presque en une demi-heure, y compris la lecture de la bande du chronographe.

Une détermination complète de la latitude exige un temps relativement plus long, mais en choisissant convenablement les étoiles au sud et au nord auprès du méridien, on peut aussi essentiellement simplifier le calcul.

Pour ne pas être obligé de donner au prisme achromatique des dimensions excessives, nous avons renoncé aux miroirs directement se croisant et nous les avons placé à des distances différentes devant l'objectif; de cette façon les rayons entrent par les deux moitiés, droite et gauche, d'une seule

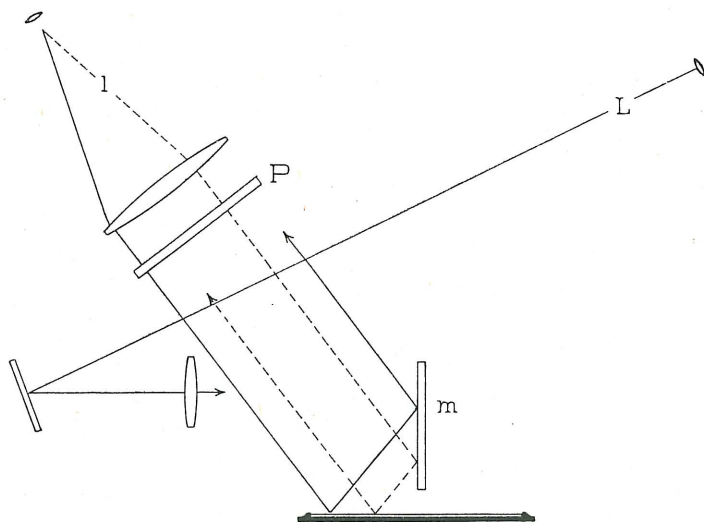


Fig. 8.

ouverture celle-ci ayant la même grandeur que l'objectif, comme le montre la figure 7. Dans ce cas la rectification décrite dans nos publications précédentes⁵⁾ devient impossible. Mais nous pouvons nous arranger facilement de la manière suivante. Le support avec les miroirs étant enlevé, nous le remplaçons par un miroir auxiliaire *m* (fig. 8.) que nous réglerons par l'autocollimation jusqu'à ce qu'il soit perpendiculaire à l'axe de la lunette *L* de l'appareil. Ensuite, toujours par autocollimation nous réglons la lunette fixe *l* jusqu'à ce que son axe soit perpendiculaire à l'arête du dièdre formé par les deux plans, celui du miroir auxiliaire et celui de la surface du bain de mercure. Cela

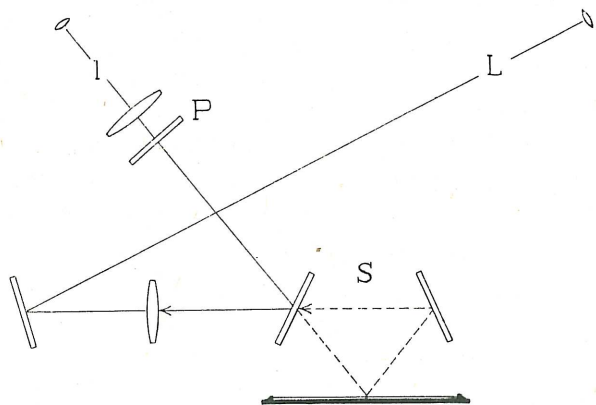


Fig. 9.

nous permet de corriger la position de la glace plane et parallèle *P* couvrant l'ouverture de l'appareil, afin qu'elle soit aussi perpendiculaire à l'axe de la lunette *l*.

⁵⁾ „Rozpravy“ de l'Académie des Sciences de Bohême Année X, Prague 1901. No 20 p. 3-6. Bulletin astronomique Paris 1901. Tome XIX pages 265 — 268.

Ces opérations finies, nous enlevons le miroir auxiliaire m , la lunette l , nous replaçons le support S avec les miroirs (fig. 9.) et éclairons les fils dans l'oculaire. En corrigeant l'orientation du support autour des trois axes mutuellement perpendiculaires à l'aide des vis respectives, nous trouverons finalement une certaine position du support, dans laquelle les rayons émis par les fils brillants dans l'oculaire se réfléchiront sur les miroirs et sur la glace plane et parallèle P de telle manière, qu'ils reviendront dans l'oculaire exactement à leur point de départ. Et l'appareil est rectifié, c'est-à-dire que l'axe de la lunette de l'appareil est perpendiculaire à la ligne d'intersection des plans des miroirs.

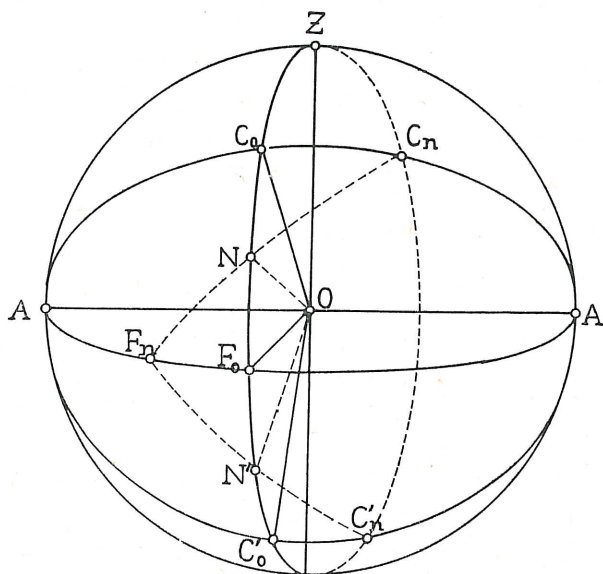


Fig. 10.

On peut aussi rectifier l'instrument, plus simplement encore, avec une précision suffisante, en se basant sur les considérations suivantes.

Supposons que l'appareil soit déjà rectifié et représentons dans la fig. 10. le plan de l'horizon par AF_0A , la ligne d'intersection des plans des miroirs par AA , les normales aux miroirs par ON, ON' et puis la perpendiculaire à AA , qui est symétrique aux ON, ON' et coïncide avec l'axe de la lunette de l'appareil par OF_0 . A chaque point F_n de l'horizon AF_0A appartient deux points C_n et C'_n déterminés par la loi de réflexion: $F_nN = C_nN$ et $F_nN' = C'_nN'$. L'ensemble de ces points C_n et C'_n se trouve sur deux grands cercles AC_nA et AC'_nA , situés symétriquement par rapport à l'horizon et aux normales ON et ON' . Si C_n est une étoile, C'_n est son image dans le bain de mercure.

Dans chaque point du plan focal de la lunette de l'appareil, correspondant au point F_n de la sphère, nous trouvons l'image du point C_n en coïncidence avec l'image du point C'_n et à chacune de ces coïncidences correspond une certaine hauteur de l'étoile C_n ,

$$h_n = \frac{1}{2} C_n C'_n.$$

Quand la coïncidence a lieu au point F_0 , dans l'axe de la lunette, l'étoile se trouve en C_0 dans la hauteur maximum

$$h_0 = \alpha.$$

Si nous observons les coïncidences en dehors de l'axe de la lunette dans F_n , la hauteur h_n de l'étoile C_n est plus petite que la hauteur maximum α de $(\alpha - h_n)$. Si nous appelons γ_n la distance angulaire du point F_n de l'axe de la lunette, c'est à dire $\gamma_n = F_0 F_n = C_0 C_n$, alors le triangle sphérique $Z C_0 C_n$ nous permet de calculer

$$\sin h_n = \sin \alpha \cos \gamma_n,$$

et en négligeant les termes du troisième ordre en γ , il s'en suit

$$\alpha - h_n = \gamma_n \operatorname{tg} \frac{\gamma_n}{2} \operatorname{tg} \alpha.$$

Cela signifie que, la coïncidence ayant lieu dans la distance γ de l'axe de la lunette

$$\gamma_n = \pm 1', 2', 4', 8',$$

l'étoile est dans la hauteur α , diminuée de $\alpha - h_n$, soit respectivement de

$$\alpha - h_n = +0.008'', 0.03'', 0.12'', 0.5''.$$

Si l'on veut alors observer les passages de l'étoiles à travers un cercle de hauteur constante avec une erreur moindre que $0.1''$, il suffit, d'après les chiffres précédents, d'observer les coïncidences dans la distance de $3'$ à gauche ou à droite de l'axe de la lunette, si l'appareil est bien rectifié.

Pour faire cette rectification nous employons une étoile artificielle, réalisée par un collimateur fixe (comme l dans la fig. 8.) placé devant la principale ouverture de l'appareil. La hauteur de cette étoile artificielle étant constante, la coïncidence change de la double valeur $2(\alpha - h_n)$ d'après la distance γ_n de la coïncidence du milieu du champ. Les détails de la rectification seront maintenant faciles à comprendre. Nous trouvons dans le champ de l'oculaire les deux paires d'images et nous les amenons en coïncidence parfaite dans le milieu du champ en maniant successivement les différentes vis de correction, celle de l'horizontalité de l'arête des miroirs, celle de l'azimut de l'appareil et celle du pied du collimateur. Si maintenant nous changeons l'azimut de l'appareil, pour amener la coïncidence à différentes distances du milieu du champ, la coïncidence cesse d'être parfaite, parce que, comme nous l'avons déjà dit, les deux paires d'images s'éloignent de $2(\alpha - h_n)$ l'une de l'autre dans le même sens, si leur distance du milieu du champ est de $\pm \gamma_n$. Dans ce cas la coïncidence centrale est bien insensible pour les changements en azimut — circonstance qui, si elle est avantageuse pour l'observation de passage à travers le cercle de hauteur égale α , est insuffisante pour la rectification, car, la hauteur de l'étoile, correspondant à la coïncidence centrale, étant maximum, la limite de changement de hauteur avec γ est zéro. Mais faisons varier d'un peu la hauteur de notre étoile artificielle, en maniant les vis du tripod du collimateur et changeons l'azimut jusqu'à ce que la coïncidence ait lieu à l'extrême gauche du champ. Si par un changement de l'azimut, nous faisons traverser la coïncidence par le milieu du champ, la coïncidence cesse d'être parfaite.

Si l'appareil est bien rectifié, l'écart de la coïncidence parfaite est maximum dans le milieu, il diminue dans la moitié droite jusqu'à une nouvelle coïncidence à l'extrême droite. Ces deux coïncidences latérales, symétriques au milieu du champ dans le cas d'une rectification accomplie, sont plus sensibles aux changements d'azimut, que ne l'était la coïncidence centrale, parce que

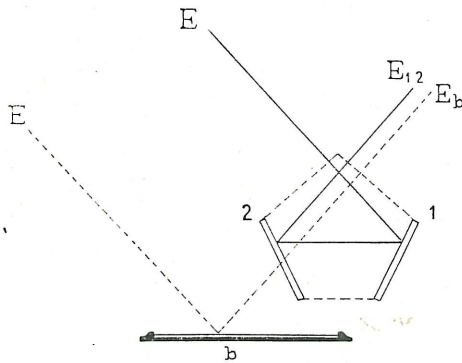


Fig. 11.

la hauteur correspondante, n'étant pas maximum, son changement avec γ_n est fini. Si au contraire les coïncidences latérales ne sont pas symétriques au milieu du champ, la rectification est insuffisante et il faut alors tourner le support des miroirs dans l'azimut jusqu'à ce que l'arête des plans des miroirs soit perpendiculaire à l'axe de la lunette, c'est-à-dire, jusqu'à ce que les coïncidences latérales soient symétriques par rapport au milieu du champ.

(Voire aussi No 2. de ces Publications pages 15—18.)

J'ai dit au commencement de mon étude, quelles considérations m'avaient permis de trouver, d'après le principe du sextant celui de l'appareil circumzénithal. Je veux mentionner encore une autre possibilité, connue dès longtemps, non utilisée, quoique assez importante. On peut construire un appareil de hauteur égale en conservant entièrement la marche des rayons lumineux du sextant.

Rappelons-nous que la réflexion des rayons sur le miroir de l'alidade du sextant est défavorable dans certains cas. Si nous observons dans la hauteur de 50° , l'angle de l'incidence des rayons tombant sur le premier miroir, est considérable soit de 55° . (fig. 1.). On peut facilement éviter ce défaut en tournant le système des miroirs 1 et 2 autour de la ligne de leur intersection, jusqu'à ce qu'on trouve la position symétrique par rapport aux rayons incidents et réfléchis comme le montre la figure 11. Cette rotation n'entrave pas la coïncidence des rayons $E_{1,2}$ et E_b et, les rayons ne tombent sur les miroirs que sous l'angle de 25° , comme dans le circumzénithal.

On peut aussi remplacer le système des miroirs par un seul prisme pentagonal, d'après la figure 11 avec deux plans de réflexion argentés. Les rayons passent — comme dans le sextant — par les deux moitiés de la lunette, droite et gauche, et l'appareil est tout à fait indépendant de la mise au point. C'est un appareil parfait de hauteur égale à prisme.

M. le Dr. A. Beck a déjà indiqué ce dispositif et ce prisme, dans le mémoire cité des A. N. 3102. Seulement, sur la figure respective 1b, il a conduit les rayons, venant du prisme, par la moitié supérieure de l'objectif: ceci entraînerait nécessairement des erreurs dans la hauteur pour chaque changement de la mise au point.

La même marche des rayons lumineux du sextant, a été employée pour le cas de deux miroirs, par M. H. Chrétien (Comptes Rendus 27 avril 1914.

T 148.), qui propose de couvrir un seul des miroirs d'une couche semi-argentée pour qu'on puisse observer les deux faisceaux de rayons lumineux par la pleine ouverture de l'objectif. Cette belle proposition, non réalisée jusqu'ici, mérite, me semble-t-il, une considération approfondie. J'en parlerai encore dans le chapitre suivant consacré aux problèmes discutés récemment à propos de tous les appareils de hauteur égale.

II.

Le Congrès de l'Union Astronomique et de l'Union Géodésique, tenu au mois de mai en 1922 à Rome, a émis le vœu, sur la proposition du Bureau des Longitudes à Paris, de créer un réseau mondial fondamental des longitudes. La réalisation de ce réseau a été confiée à une Commission des Longitudes spéciale, composée des membres de ces deux Unions. Cette commission a tenu plusieurs séances, en automne 1924, au Congrès de l'Union géodésique et géophysique à Madrid. On a constaté d'abord que les pendules directrices, comparées à l'aide de la télégraphie sans fil donnent avec certitude une centième de seconde. Au contraire, la détermination astronomique de l'heure laisse encore beaucoup à désirer. M. Bowie, délégué du Coast and Geodetic Survey américaine a constaté que, depuis qu'on a entrepris, en Amérique, les mesures des longitudes à l'aide de petits appareils méridiens, munis d'un micromètre impersonnel, sans ou avec mouvement automatique, on a pu fermer les polygones mesurés avec une précision de $\pm 0,01^s$. Il a émis l'opinion que les discordances, atteignant parfois $0,1^s$ constatées dans les dernières années sont dues aux grands appareils méridiens, gênés par la proximité des bâtiments. Les appareils américains, en excellent accord entre eux, sont toujours placés en plein air, loin des bâtiments habités.

Après de longs débats il a été décidé, que le président de la Commission enverrait à tous les membres le premier projet d'observations simultanées. Tous les pays possédant de petits appareils méridiens, semblables aux appareils américains, transportables (par exemple ceux de Bamberg, Prin, Troughton et Sims etc.) et munis d'un micromètre impersonnel, devraient prendre part à ce travail.

Le programme établi à Rome se trouve ainsi essentiellement modifié, comme l'a fait remarquer le président de la Commission, M le général Ferrié. On suppose, pour les appareils d'un seul type, soit l'erreur systématique constante ou zéro. D'après le programme de Rome on devait installer dans chaque point fondamental du polygone deux appareils au moins de types différents, pour pouvoir constater les erreurs systématiques. Après cette importante remarque, il a été voté que „pour le polygone principal on utiliserait aussi un autre type d'instrument, afin de pouvoir vérifier l'existence d'erreurs systématiques“.

C'est aussi pourquoi M. Bigourdan, directeur du Bureau International de l'Heure a proposé d'inviter les différents pays à collaborer, pour la détermination de l'heure, dans un même observatoire, par exemple celui de Paris

avec des instruments de types différents. Cette proposition serait la plus utile, s'il était possible de trouver des instruments sans erreurs systématiques, donnant l'heure absolue. On pourrait ensuite déterminer les erreurs systématiques des autres instruments et prouver, peut être, si elles sont constantes, ou si elles varient.

En ce qui concerne les instruments sans erreurs systématiques, je crois que c'est surtout quelque appareil photographique muni d'un bain de mercure qui a le plus de chances de devenir l'instrument absolu de l'heure, dans le sens indiqué plus haut. Le premier appareil de ce type est un astrolabe à prisme photographique, qui a été construit et étudié par M. René Baillaud à l'observatoire de Nice.⁶⁾ L'objectif de son instrument — grand modèle — est de 18 cm de diamètre et de 1,9 m de distance focale; les réflexions des rayons lumineux ont lieu extérieurement sur les surfaces argentées d'un prisme à angle de 45°. A la variation d'une seconde d'arc dans la hauteur de l'étoile correspond un déplacement de 0,02 mm de l'image double de l'étoile, sur la plaque photographique. Les images d'une étoile horaire parcourent la distance de 6 mm en 30 secondes. Les deux traces photographiques ont été coupées à chaque seconde par un obturateur, réglé électriquement par le balancier d'une pendule directrice. Le commencement de la minute a été indiqué par un intervalle plus long. On n'a employé le chronographe que pour enregistrer les heures exactes de l'ouverture de l'obturateur et cela seulement de temps en temps pour mesurer les retards du mécanisme.

La double trace photographique coupée ainsi qu'il est dit plus haut a donné pour α Bouvier 17 instants de passage, avec erreur probable d'un instant individuel de $\pm 0,04^s$, et de l'instant du passage complet de $\pm 0,01^s$. Le 10. mars 1921 les passages de 24 étoiles ont été photographiés. L'erreur moyenne probable de la correction simple de la pendule, déterminée par un seul passage a été de $0,03^s$.

En comparant ces deux résultats de M. Baillaud, l'erreur d'un passage complet de $\pm 0,01^s$, et celle de l'heure, déterminée de ce passage de $\pm 0,03^s$, nous y constatons une différence considérable. C'est la même différence que nous avons signalé, nous aussi, dans toutes nos séries de déterminations de l'heure avec l'appareil circumzénithal. Nous avons soupçonné en 1903 et en 1906 que la cause en pourrait être des anomalies de la réfraction. M. R. Baillaud, en reproduisant nos considérations, prétend qu'une autre explication serait préférable. Il dit: „Je dirai pourtant que, comme M. M. Nušl et Frič, j'ai été frappé dès le début par ce fait, qui me paraissait anormal, que „l'erreur moyenne d'un seul passage complet est généralement plus petite que l'erreur moyenne de la détermination de l'heure résultant de ce passage“. Mais je pense que c'est la déformation des images, ou si l'on veut, l'équation de grandeur qui en est la principale cause“.

Cette nouvelle explication nécessite un examen plus détaillé.

⁶⁾ Thèses présentées à la faculté des Sciences de Paris 1923. Serie A n° 934. René Baillaud: Détermination de l'heure au moyen de l'instrument photographique des Hauteurs égales.

L'appareil photographique de M. R. Baillaud contient un prisme placé devant l'objectif, ce qui occasionne la division des rayons en deux parties par un plan horizontal, et cause des variations dans la hauteur à chaque variation de la mise au point. Si par exemple un changement de température modifiait la distance de l'objectif de la plaque photographique, la hauteur des passages changerait simultanément. Mais en supposant la plaque sensible toujours à la même place, il ne peut exister de changements de hauteur, parce que la mise au point est constante. M. Baillaud a cependant fait observer, que par suite de la division horizontale et semi-circulaire du faisceau lumineux, les images stellaires sont déformées de telle manière, que la hauteur du centre de gravité de chacune des deux traces sur la plaque change avec la sensibilité de l'émulsion ou selon les différentes grandeurs stellaires. Il s'en suit un changement dans la hauteur de l'étoile, qui correspond à chaque coïncidence de ces images, différemment déformées. Donc la même cause instrumentale, qui change la hauteur avec la mise au point dans l'astrolabe à prisme, change aussi la hauteur dans l'appareil photographique de M. Baillaud suivant la sensibilité des plaques et la grandeur des étoiles. Et c'est cette nouvelle variation de la hauteur, causée par les déformations des images stellaires par les faisceaux semi-circulaires, hauts et bas, que M. Baillaud appelle l'équation de grandeur.

Si l'équation de grandeur était constante, par exemple si nous photographions les passages d'une même étoile à l'est et à l'ouest, sur la même plaque, la détermination de l'heure, à l'aide de ces deux passages, ne serait affectée par aucune erreur systématique. Par contre si nous calculons l'heure d'après les photographies de plusieurs étoiles de grandeurs différentes, sur des plaques de sensibilité différentes, l'équation de grandeur varie et influence le résultat. Mais les erreurs qui en résultent dans l'heure disparaissent à peu près, ayant des signes contraires selon qu'on a observé à l'est et à l'ouest. Et dans ce sens là elles peuvent être considérées comme accidentelles avec d'autant plus de droit, qu'on a observé de différentes étoiles à l'est et à l'ouest. Et ce sont ces erreurs accidentelles, qui d'après l'explication de M. Baillaud, devraient surtout augmenter l'erreur moyenne de la détermination de l'heure à l'encontre de l'erreur moyenne d'un seul passage.

Lors des observations faites avec notre premier modèle de l'appareil circumzénithal, muni d'un prisme, c'est-à-dire jusqu'en 1903, nous avons aussi constaté un phénomène semblable. Les observations du passage de l'étoile la plus brillante dans nos séries, α Lyrae, même quand elles étaient qualifiées de „très bonnes“, donnaient souvent de „très mauvais“ résultats. A cette époque là nous n'avons pas pensé à une équation de grandeur dans le sens que lui donne M. R. Baillaud. Nous avons cru le phénomène occasionné par le changement de l'accommodation de l'oeil de l'observateur. Ce changement pourrait avoir son influence, mais certainement aussi l'équation de grandeur selon M. Baillaud. Mais en 1906, nous avons remplacé le prisme par des miroirs, celui de gauche et celui de droite, pour supprimer les variations dans la hauteur. Les déformations d'images, causées par les faisceaux semi-circu-

lares subsistaient encore, mais leur orientation était changée de 90° . Si alors dans le premier cas (1903) ces déformations changeaient la hauteur des images, dans notre nouvel appareil elles ne changeaient que leur azimut. Il ne peut alors pas être question d'une équation de grandeur, et en effet α Lyrae reentra immédiatement au rang des étoiles régulières. En 1903 nous avons obtenu l'erreur probable d'un passage complet de $\pm 0,030^s$ et l'erreur d'une détermination de l'heure de $\pm 0,058^s$. En 1906 ces deux erreurs diminuèrent notablement jusqu'à $\pm 0,019^s$ et $0,038^s$ respectivement, mais leur différence restait inexpiquée.

Nous avons cru et nous croyons encore que la cause est d'être aux anomalies de la réfraction. Voici ce que nous avons observé pour le prouver. Avec le grossissement de 70 fois (I et II modèle de circumzénithal) ou de 140 fois (III modèle) on voit déjà distinctement les variations de la réfraction qui, d'une manière ininterrompue déplacent les images de l'étoile. Mais ce qui est très important, c'est que la position d'équilibre de ces oscillations change quelquefois brusquement et irrégulièrement pour quelques dizaines de secondes. Ce sont les anomalies de la réfraction qui en sont la cause, et qui se manifestent très bien dans le mouvement lent de l'Etoile Polaire. Au moment d'une coïncidence prochaine, nous étions souvent surpris par une discontinuité frappante: la coïncidence était déjà „longtemps passée“ Ou inversement: nous signalions une coïncidence de la Polaire et l'instant d'après nous constatons de nouveau avec surprise, que la coïncidence allait seulement avoir lieu, et nous la signalions pour la seconde fois. Plus tard, en 1908 nous avons démontré l'existence de ces anomalies à l'aide d'un grand objectif photographique, de Zeiss, de 6 m de distance focale et de 25 cm de diamètre.⁷⁾ Il s'est trouvé des cas où la position d'équilibre était déplacée d'une demi seconde d'arc même, pendant une minute

Il est très probable, comme le croit M. Baillaud, que l'influence de ces anomalies devient insensible dans toute une série d'observations, ou, comme nous l'avons dit en d'autres termes, elles augmentent seulement l'erreur moyenne dans la détermination de l'heure. Mais ceci ne peut pas être soutenu sans de nouvelles études spéciales, surtout en ce qui s'agit de la crainte exprimée par M. Baillaud, page 104 de sa Thèse: „Ce qui nous semble le plus à redouter, c'est une différence systématique entre les valeurs de la réfraction à une même hauteur, à l'est et à l'ouest. Si une telle différence existait, elle entacherait les corrections de pendule conclues, d'erreurs qu'il serait très difficile de déterminer.“

Je voudrais souligner encore les conclusions suivantes qui terminent l'ouvrage de M. Baillaud. Voici ce qu'il dit: „De toutes les causes d'erreur que nous avons examinées et qui se rapportent à l'instrument lui-même, aucune ne nous est apparue comme ayant un caractère systématique. Parmi ces causes d'erreur, la plus importante semble être celle qui est due à ce que les images sont déformées, chacune d'elles n'étant donnée que par la

⁷⁾ *Bulletin international de l'Académie des Sciences de Bohême* Prague 1908. Nušl et Frič: Première étude sur les anomalies de réfraction.

moitié de l'objectif. L'erreur qui en résulte pour la correction de pendule conclue est fonction de la grandeur et de la déclinaison de l'étoile, et de la sensibilité de la plaque. On la diminuera efficacement en augmentant autant qu'on le pourra la distance focale et le diamètre de l'objectif... On pourrait être tenté de calculer empiriquement pour chaque étoile la correction à faire subir à l'heure de coïncidence pour tenir compte de l'équation de grandeur... Mais il est possible que l'équation de grandeur soit variable d'un jour à l'autre, et il est plus satisfaisant de l'éliminer que de la déterminer et d'en tenir compte. Parmi les essais que l'on peut entreprendre, les plus intéressants sont ceux qui permettront d'obtenir que chacune des images soit fournie par la totalité de l'objectif. On éviterait ainsi qu'elles soient déformées et on éliminerait sans doute l'équation de grandeur."

Je suis absolument d'accord avec ces conclusions mais je désirerais voir la réalisation de „ces essais, que l'on peut entreprendre“. Je ne mets pas en doute qu'avec le système de miroirs de circumzénithal, placés côte à côte l'appareil photographique de M. Baillaud ne devienne indépendant de l'équation de grandeur aussi bien, que des changements dûs à la température, tout comme si les deux images étaient formées par la pleine ouverture de l'objectif. Mais s'il s'agissait de la construction d'un appareil photographique parfait de hauteurs égales, je n'hériterais point à employer un miroir semi-argenté. On pourrait appliquer le dispositif de M. Chrétien, avec lunette inclinée, ou le dispositif du circumzénithal avec lunette horizontale, ou même aussi ces deux dispositions combinées, ainsi que je l'ai dessiné sur la figure 12. Les deux cas de rayons coïncidents, équivalents, sont désignés ici par $E_{12} E_b$ et $E_1 E_{b2}$ selon qu'ils appartiennent au principe du sextant ou à celui du circumzénithal. On obtiendrait ainsi un appareil double des hauteurs égales, permettant d'obtenir deux photographies simultanées sur deux plaques différentes, toutes deux formées par la pleine ouverture d'un de ces deux objectifs.

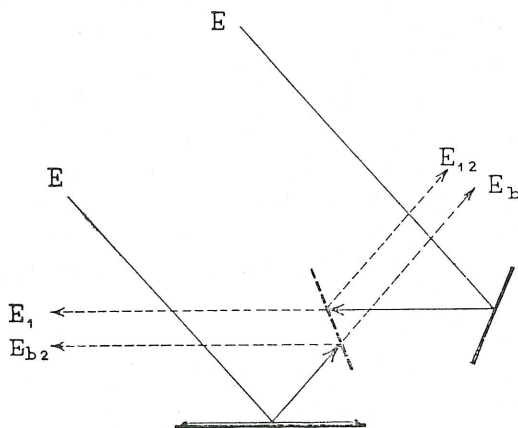


Fig. 12.

Je crois qu'à l'Observatoire de Nice il serait facile de compléter le grand modèle existant de M. Baillaud, au moins pour le simple chemin des rayons de l'appareil circumzénithal. M. Baillaud dit dans le Journal des Observateurs, Nro. 9. 1924. pag. 100: „... l'élimination le mieux possible des erreurs, principalement celles qui sont systématiques... C'est ce résultat que nous avons cherché à obtenir par l'instrument photographique des hauteurs égales. Ce dernier présente pourtant l'inconvénient d'être lourd et encombrant et de mise en station assez délicate et ne peut être regardé comme un

instrument de campagne." C'est vrai et j'ajoute encore que les mesures des plaques et les calculs sont longs, mais tout cela est sans importance, quand on songe à ce qu'on obtiendrait ainsi un appareil étalon normal pour l'heure, rigoureusement exempt de toute erreur systématique. Les résultats excellents déjà obtenus par l'appareil existant, le travail consciencieux et le sens critique de M. Baillaud prouvent que c'est lui, l'astronome appelé à l'accomplissement de ce but.

L'Observatoire de Nice a un cercle méridien transportable de Gautier, avec lequel M le Directeur G. Fayet a déterminé la différence Paris-Nice en 1921. En même temps M. Baillaud déterminait l'heure avec son appareil photographique pendant 9 soirées. En tenant compte de la différence de longitude de ces deux instruments on a trouvé un écart bien constant de $0,07^s \pm 0,01^s$ causé, d'après M. Baillaud, par l'erreur systématique de l'un ou de l'autre instrument, ou de tous deux. Si on pouvait compléter l'appareil photographique des hauteurs égales avec un dispositif permettant d'utiliser les moitiés gauche et droite de l'objectif, ou sa pleine ouverture, une erreur systématique, de cette importance, serait plutôt admissible pour tous les autres appareils, que pour l'appareil photographique. Ces comparaisons, recommandées par la Commission Internationale des Longitudes, pourraient devenir des plus importantes, si on observait simultanément avec les astrolabes à prisme visuels de l'Observatoire de Nice, munis de micromètres impersonnels, l'un à fil entraîné de M M Michkovitch et Mallein⁸⁾ et l'autre à lames tournantes de M. Baillaud⁹⁾.

En ce qui concerne l'appareil photographique, il ne me reste qu'à mentionner encore un point, où M. Baillaud et moi nous sommes d'une opinion différente. Selon son mémoire, publié dans le Journal des Observateurs du 15 septembre 1924, mémoire le plus complet, concernant toutes sortes d'erreurs possibles dans les instruments des hauteurs égales, M. Baillaud se méfie du support métallique des miroirs. Il craint les changements d'angle, dûs aux variations de la température. Je suis, au contraire, pour le support métallique, prétendant que, surtout pour la monture des miroirs couvrant la pleine ouverture de l'objectif, on réussirait facilement à couler un support très solide d'une seule pièce. D'après nos expériences spéciales que je veux mentionner tout de suite, j'aurais plus de confiance en son invariabilité, qu'en celle d'un grand prisme de verre, mauvais conducteur de la chaleur et ce qui est encore pis, dont l'épaisseur est inégale. Le grand miroir de 100 pouces de M. Ritchey, à l'observatoire de Mt. Wilson, d'épaisseur bien égale doit être maintenu pendant le jour à une température déterminée, choisie et ce n'est que quand pendant la nuit la température extérieure tombe à celle du thermostat, qu'on peut bien observer.

J'ai dit déjà plus haut pourquoi nous avons abandonné le prisme dans le deuxième modèle du circumzénithal pour le remplacer par deux miroirs croisés. Leur support était un peu compliqué et nous craignons, nous aussi

⁸⁾ *Comptes Rendus* t. 178. Paris Juin 1924.

⁹⁾ *Comptes Rendus* t. 178. Paris Avril 1924.

une variation de l'angle des miroirs, causée par la température, tout en espérant que ces variations seraient régulières. A notre satisfaction cette supposition se trouva confirmée. Mais à notre surprise, outre cette variation régulière, dépendant de la température, il en existait encore une, régulière elle aussi, mais dépendant du temps. Le support des miroirs comprenait plusieurs pièces vissées l'une à l'autre, et il est possible, que les tensions dans ce genre de construction changeaient lentement la forme du support.

Dans notre Deuxième Etude un chapitre entier page 24—29 est consacré à ces changements de l'angle des miroirs. Dans un intervalle d'à peu près deux mois nous avons observé 9 séries complètes de passages. Chaque jour donnait 9 déterminations indépendantes de la hauteur (égale à l'angle des miroirs), chacune d'elles déduite comme milieu de 7 instants individuels d'un passage. En désignant par d la date, par τ^0 la température de l'intérieur de l'appareil, par ΔV la différence entre le milieu des 9 déterminations de la hauteur et entre la hauteur moyenne, puis par ΔV calc. le résultat du calcul d'après la formule :

$$\Delta V \text{ calc.} = -2'',088 + 0'',1253 (d - 1. \text{VII.}) - 0'',6536 (\tau - 10^0),$$

et en comparant ΔV et ΔV calc., il en résulte les erreurs résiduelles suivantes :

d	τ^0	ΔV	ΔV calc	Erreurs
1905. VII. 1.	20,4	-8'',87	-8'',78	-0'',09
26.	14,9	-2,04	-2,06	+ 2
29.	12,8	-0,13	-0,32	+ 19
VIII. 3.	18,6	-3,34	-3,48	+ 14
8.	13,7	+0,13	+0,35	- 22
9.	18,0	-2,28	-2,34	+ 6
15.	15,2	+0,26	+0,24	+ 2
17.	13,3	+1,76	+1,73	+ 3
18.	15,4	+0,41	+0,49	- 8

$$\Sigma r^2 = 0,1239$$

$$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{\Sigma}{9-3}} = \pm 0'',096.$$

Comme le montre la colonne ci-dessus, les hauteurs observées et calculées sont en accord surprenant. L'erreur moyenne d'une hauteur observée (déduite de 9 passages complets d'un jour) atteint $\pm 0'',1$, ce qui correspond à l'erreur de $0'',15$ degrés de température du support, ou à l'erreur d'un jour dans la date d'observation.

La formule donnant si exactement la hauteur dans l'intervalle de 49 jours, nous avons essayé de calculer l'heure à l'aide de cette formule d'après la méthode la plus simple, de hauteur absolu décrite dans l'Etude de 1903, page 38. Nous n'avions pu réussir l'exécution pratique de cette méthode en 1903, parce que la détermination de la hauteur était rendue impossible par les anomalies de hauteur, provenant des variations de la mise au point. Mais dans la Deuxième Etude 1906 on trouve, pages 36—38 tous les chiffres appartenant

à une longue série d'observations et de calculs du 11. IX. 1905, (observateur Frič). Le résultat prouve que cette fois-ci nous avons complètement réussi en obtenant une détermination de l'heure de chaque passage complet (moyenne de 7 instants individuels) n'ayant qu'une erreur moyenne vraisemblable de $\pm 0^s,038$. Somme toute nous observâmes en 5 heures 44 étoiles, et grâce au prisme réversible nous pûmes enregistrer 120 passages complets (moyennes de 7 instants individuels) donc 120 déterminations de l'heure, tout à fait indépendantes l'une de l'autre. Seuls 9 de ces cas sur 120 présentèrent une erreur dans la détermination de l'heure dépassant $0^s,10$.

Ce succès obtenu, avec un support compliqué, nous avons perfectionné l'instrument, en construisant le support d'une seule pièce d'invar (acier-nickel). Les miroirs étaient appuyés contre trois boutons du support à l'aide de ressorts élastiques. L'instrument fut ensuite enfermé dans un thermostat et maintenu pendant l'observation à des températures déterminées. De cette façon plusieurs séries ont été observées aux températures de 10° à 35° . Les observations ont été troublées par la buée qui se déposait à l'intérieur du thermostat sur la glace plane et parallèle, qui ne pouvait être enlevée qu'entre deux observations successives. Il nous a pourtant été permis de constater que les différences, dans la hauteur n'étaient pas plus grandes que les erreurs accidentelles des observations elles-mêmes. Le thermostat se composait d'une caisse en bois, de tuyaux de zinc, en spirales, dans lesquels circulait de l'eau chaude.

Nous avons l'espoir d'améliorer notre improvisation plus tard mais pendant la guerre, nous n'avons pas pu penser à faire des observations.

Dans le troisième modèle de circumzénithal, le support des miroirs, au lieu d'être en invar, a été construit d'une seule pièce de bronze, ce-lui-ci étant un meilleur conducteur de la chaleur. D'après les rapports préliminaires, publiés par l'Institut géographique de l'Armée à Prague, l'appareil donna les résultats les plus satisfaisants, surtout en ce qui concerne la détermination de la latitude. Les déterminations de la longitude exigent un micromètre impersonnel. Dans notre Première Etude 1903 page 61. nous en avons déjà proposé la construction, réalisé plus tard et étudiée en combinaison avec un grand modèle de l'appareil diazénithal en 1908 et 1909. Mais les résultats ne furent pas satisfaisants. J'y pensai longtemps et rejetant quelques solutions moins propres, j'en trouvai une en 1922, qui nous guida M. Frič et moi, à une construction nouvelle et simple, achevée vers le milieu de 1923. Les premières observations furent faites la même année dans le mois d'août, septembre et octobre. En 1924 nous introduisîmes le mouvement automatique non seulement du micromètre, mais aussi de l'appareil en azimut, et nous espérons être prêts pour de nouvelles observations dans le cours de l'année 1925.