



HAL
open science

L'astrolabe à prisme

Claude, Driencourt

► **To cite this version:**

Claude, Driencourt. L'astrolabe à prisme. J. Phys. Theor. Appl., 1907, 6 (1), pp.950-979.
10.1051/jphystap:019070060095001 . jpa-00241274

HAL Id: jpa-00241274

<https://hal.science/jpa-00241274>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'ASTROLABE A PRISME ;

Par MM. CLAUDE et DRIENCOURT.

L'astrolabe à prisme est un instrument qui sert à observer l'instant où la hauteur apparente d'un astre atteint une valeur *rigoureusement invariable* voisine de 60° . Il est employé, soit pour la détermination de la position du zénith sur la sphère céleste à une heure donnée d'un compteur de temps par l'observation d'un certain nombre d'astres dont les positions sont supposées connues, soit au contraire pour obtenir un lieu géométrique de la position sur la sphère céleste de chaque astre inconnu observé, en partant de celle du zénith à l'instant de l'observation de cet astre supposée déterminée préala-

blement. Dans le premier cas, il donne simultanément la *colatitude* et l'*heure sidérale du lieu*, qui sont les coordonnées de la position du zénith par rapport au pôle et au méridien du point équinoxial γ .

• Dans le second, les coordonnées dans le même système de l'intersection de deux lieux géométriques d'un même astre obtenus soit au même point, soit en deux points différents, sont la *distance polaire* et l'*ascension droite* de cet astre. L'instrument est donc, comme le cercle méridien, destiné à la détermination des *positions géographiques* et des *positions des astres*; mais, sous sa forme actuelle, il n'est pas fait, comme lui, pour donner l'azimut avec précision.

I. — MÉTHODE DES HAUTEURS ÉGALES.

La méthode que l'instrument permet d'appliquer est *celle des hauteurs égales de Gauss généralisée*, dont le principe est le suivant.

PRINCIPE DE LA MÉTHODE. — Supposons qu'on ait noté, à un compteur de temps dont la marche est connue, les heures t_1, t_2, \dots, t_n , auxquelles n astres A_1, A_2, \dots, A_n ont atteint une même distance zénithale *apparente* ζ_a . A_p désignant l'un quelconque de ces astres dont la position est connue, son observation fournit, de la position Z_p du zénith du lieu sur la sphère céleste à l'heure t_p , un lieu géométrique qui est le petit cercle décrit de A_p comme centre avec la distance zénithale *vraie* $(\zeta_a + \varphi_p)$ comme rayon sphérique ($\varphi_p =$ réfraction à l'heure t_p). Il jouit de la propriété d'être perpendiculaire en chacun de ses points à la direction de l'astre A_p . Nous le désignerons sous le nom de *cercle de hauteur*, pour le distinguer de la courbe de hauteur, qui est le lieu correspondant sur la surface terrestre.

On a ainsi autant de cercles de hauteur qu'il y a d'astres connus observés; mais chacun d'eux se rapporte à une position particulière du zénith, celle qui correspond à l'heure de l'observation. A l'aide des heures notées t_1, t_2, \dots, t_n , il est aisé de déplacer tous ces lieux sur la sphère céleste pour les faire se rapporter à une même position Z_0 du zénith correspondant à l'heure t_0 arbitrairement choisie du compteur de temps.

Le lieu de Z_p , par exemple, devient un lieu de Z_0 , si on lui fait subir autour de la ligne des pôles une rotation égale à celle qui est nécessaire pour amener Z_p à coïncider avec Z_0 , c'est-à-dire à

$15[t_0 - t_p + m(t_0 - t_p)]$, en appelant m la marche du compteur sur le temps sidéral dans l'unité de temps qui sert à exprimer t_0, t_1, \dots, t_n ; la rotation étant comptée positivement dans le sens des ascensions droites croissantes. Cela revient à augmenter l'ascension droite α_p de A_p de la quantité

$$t_0 - t_p + m(t_0 - t_p).$$

Posons, pour abrégé,

$$\alpha_p^0 = \alpha_p + t_0 - t_p + m(t_0 - t_p),$$

et désignons par A_p^0 la position qu'occupe le centre du petit cercle après la rotation, c'est-à-dire le point qui a même distance polaire que A_p , et α_p^0 pour ascension droite.

Le lieu de Z_0 ainsi obtenu est perpendiculaire à la direction azimutale de l'astre comme l'était celui de Z_p : *il peut donc être considéré comme un cercle de hauteur fourni par l'observation de l'astre fictif A_p^0 à l'heure t_0 , avec cette restriction cependant que le rayon reste $(\zeta_a + \rho_p)$, ρ_p correspondant à l'heure t_p et non à l'heure t_0 . On observera également que, tandis que le centre A_p du lieu de Z_p n'est affecté que des erreurs de ses coordonnées, distance polaire δ_p et ascension droite α_p , l'ascension droite α_p^0 comprend en outre l'erreur d'observation changée de signe commise sur t_p et l'erreur du terme $m(t_0 - t_p)$ résultant de l'erreur sur la marche m employée.*

Si ces erreurs n'existaient pas et si, de plus, le rayon $\zeta_a + \rho_p$ était connu exactement, le cercle de hauteur résultant de l'observation de A_p^0 passerait exactement par le point Z_0 . On aurait ainsi autant de lieux concourant en Z_0 que d'astres connus observés. Deux de ces astres choisis de manière que leurs directions azimutales se coupent sous un angle convenable suffiraient pour déterminer Z_0 .

Mais chaque lieu est affecté d'une erreur qui dépend à la fois de celle de la position du centre et de celle de rayon. Cette dernière, qui entraîne un égal déplacement du lieu, est la somme algébrique de celles de la distance zénithale apparente ζ_a et de la réfraction tabulaire ρ_p . *Admettons la symétrie de la réfraction autour de la verticale à la distance zénithale ζ_a , et supposons, en outre, pour simplifier l'exposé, que la température et la pression n'aient pas varié durant la série des observations, en sorte que la réfraction ait*

conservé la même valeur ρ . (Rien ne serait plus facile, dans le cas contraire, que de tenir compte des variations de rayon, telles que $\rho - \rho$, pour chaque lieu.)

Dans ces hypothèses, ζ_a étant constant par définition, la distance zénithale vraie $\zeta_v = \zeta_a + \rho$ est elle-même une constante. Gauss a eu l'idée géniale de considérer cette constante comme *une inconnue à déterminer par les observations*, afin d'éliminer à la fois les erreurs de ses deux termes qui affectent de la même manière tous les lieux géométriques de Z_0 .

Soit alors (fig. 1) ζ'_v une valeur approchée quelconque ζ_v , telle que :

$$\zeta_v = \zeta'_v + \Delta\zeta'_v.$$

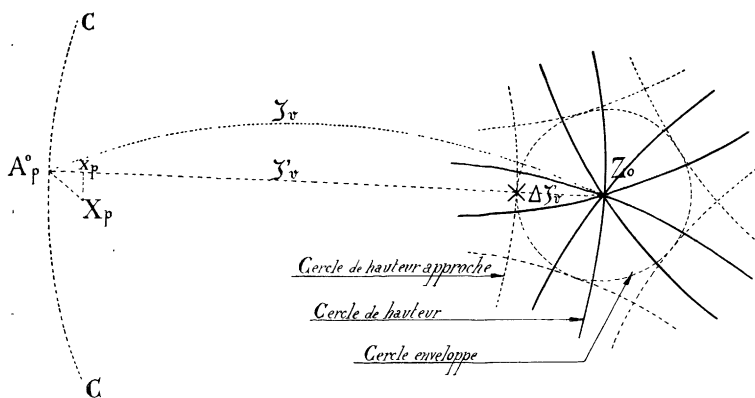


FIG. 1.

Le cercle de hauteur approché tracé de A_p comme centre avec ζ'_v comme rayon sphérique, au lieu de passer par le point Z_0 , en passera à la distance sphérique $\Delta\zeta'_v$, comptée positivement dans la direction de l'astre, abstraction faite, bien entendu, des erreurs de position de l'astre, d'observation et de marche du compteur de temps. En appliquant la même construction pour tous les astres connus observés, on aura autant de cercles, non plus concourant en Z_0 comme précédemment, mais tangents intérieurement ou extérieurement, tous dans le même sens, à un même petit cercle de rayon $\Delta\zeta'_v$ ayant pour centre Z_0 .

PROBLÈME DE GAUSS. — Il suffit évidemment de trois cercles tangents en des points convenablement espacés, par conséquent de trois astres observés dans des directions azimutales faisant entre elles des

angles convenables, pour déterminer ce *cercle enveloppe* : c'est là proprement le problème des hauteurs égales de Gauss, celui dont le grand géomètre et après lui Cagnoli ont donné des solutions directes. Il consiste à trouver sur la sphère le centre Z_0 du petit cercle CA^0_pC passant par les trois astres fictifs correspondant aux trois astres observés.

GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODE. — Mais on conçoit qu'avec trois astres seulement, si les erreurs de distance zénithale apparente et de réfraction tabulaire sont éliminées, celles de position des astres fictifs ont au contraire une grande influence sur le tracé du cercle qu'ils déterminent, puisque leurs composantes suivant le rayon interviennent tout entières.

Ainsi le point X_p (fig. 1) représentant la vraie position de A^0_p par exemple, le cercle des trois points, qui devrait passer par X_p ou par sa projection x_p sur $A^0_pZ_0$, se trouve tracé en réalité par A^0_p ; il est donc déplacé de $x_pA^0_p$, composante de l'erreur suivant le rayon $A^0_pZ_0$.

L'erreur de position de A^0_p , ainsi qu'on l'a vu plus haut, comprend trois parties :

1° L'erreur de position de A_p , résultante de l'erreur en distance polaire et de l'erreur en ascension droite. Ces composantes, qui sont tantôt positives, tantôt négatives, et dont les plus petites sont les plus nombreuses, peuvent être considérées comme des erreurs accidentelles et, pour diminuer leur influence, il faut augmenter le nombre des astres observés dans la même direction azimutale;

2° L'erreur d'observation sur t_p , qui se reporte sur l'ascension droite seule α^0_p . Elle se subdivise en deux : l'une, l'*erreur personnelle*, constante en général pour le même observateur ou du moins dont les variations, avec son état physiologique, avec l'éclat et la vitesse de l'astre, sont regardées comme accidentelles; l'autre variable : c'est l'*erreur d'appréciation* proprement dite; elle est, comme les erreurs accidentelles, indifféremment positive ou négative; mais sa grandeur, au lieu de suivre la loi des erreurs fortuites, augmente en moyenne avec la lenteur du mouvement en distance zénithale, et cela quel que soit l'observateur.

L'erreur, ou, comme on dit, l'*équation personnelle*, affectant de la même manière les ascensions droites de tous les astres fictifs, affecte également l'ascension droite de Z_0 , c'est-à-dire l'heure sidérale, comme, du reste, dans toutes les méthodes de détermination de l'heure, et on ne peut songer à l'éliminer.

Quant à l'erreur d'appréciation, elle rentre dans la catégorie des erreurs fortuites, s'il s'agit d'astres observés dans la même direction azimutale, puisque alors ils ont même vitesse zénithale au moment de l'observation. On atténuera son influence en multipliant les observations dans la même direction azimutale ;

3° Enfin, l'erreur du terme $m(t_p - t_0)$ résultant de l'erreur sur la marche adoptée, laquelle est très faible, si l'on a soin de comparer le compteur de temps immédiatement avant et après la série d'observations avec une pendule ou un chronomètre fixe à marche très régulière. Mais, comme cela n'est pas toujours possible, il convient de voir comment doivent être dirigées les observations pour que l'erreur de marche entraîne le minimum d'erreur sur la position de Z_0 .

Nous supposerons l'instrument de mesure du temps assez parfait pour que la marche puisse être considérée comme constante durant la série, ce qui, pour un instrument déterminé, est d'autant plus admissible que l'intervalle $t_n - t_0$ entre la première et la dernière observation est plus court. La valeur absolue de l'erreur de α^0_p , due à l'erreur de marche, est alors proportionnelle à $t_0 - t_p$: il y a donc intérêt à prendre pour t_0 l'heure moyenne des observations. En second lieu, elle change de signe avec $t_0 - t_p$, en sorte que, si t_0 est la moyenne des heures de passages t_p et t_q de deux astres A_p et A_q observés dans la même direction azimutale, la moyenne des deux positions A^0_p et A^0_q sera indépendante de l'erreur de marche. Les observations dans chaque direction azimutale doivent donc être deux à deux équidistantes du milieu de la série pour que l'erreur de marche soit sans influence sur les résultats.

On voit par cette analyse de l'erreur de position d'un astre fictif que, s'il était possible, dans un temps suffisamment court, de multiplier les observations suivant *trois directions azimutales* convenablement écartées et de les répartir également dans chacune d'elles de part et d'autre du milieu de la série, en remplaçant tous les astres fictifs d'une même direction par l'astre fictif moyen, on reviendrait au cas des trois astres de Gauss : le problème serait encore déterminé et l'effet des erreurs de ζ_a et de ρ supprimé ; de plus, celui des autres erreurs serait grandement atténué.

Mais, pour que des étoiles soient observables à la même hauteur et dans le même azimut, il faut qu'elles aient la même distance polaire, et le cas de deux étoiles équidistantes du pôle se présente rare-

ment, surtout parmi celles en nombre assez restreint qui sont *brillantes* et de position bien déterminée. Ce mode de généralisation de la méthode de Gauss n'est donc pas applicable.

On pourrait sans doute remplacer les trois directions azimutales par trois *régions azimutales* dans chacune desquelles on observerait un nombre égal k d'étoiles. En prenant une étoile de chaque région, on formerait k groupes entièrement distincts de trois observations qui, traitées séparément, fourniraient autant de solutions partielles dont on prendrait ensuite la moyenne. Mais, pour être en droit d'admettre que les k solutions partielles ont la même probabilité, il faudrait réduire suffisamment l'étendue des régions azimutales pour que, dans chacune d'elles, la vitesse zénithale des astres, dont dépend en grande partie la précision des observations, puisse être considérée comme constante. On n'aurait ainsi qu'un nombre beaucoup trop faible d'étoiles à observer dans le temps pendant lequel les variations de marche du garde-temps sont négligeables.

On se trouve donc conduit à observer dans tous les azimuts pour arriver à une élimination aussi complète que possible de l'influence des erreurs de position des astres fictifs. Les conclusions auxquelles nous sommes arrivés précédemment, pour la distribution la plus convenable des étoiles dans chaque direction azimutale ou mieux dans la région azimutale qui peut lui être substituée, subsistent. Mais comment doit se faire la répartition entre les différentes régions? Et comment combiner ensuite les observations pour obtenir la meilleure solution? La méthode des moindres carrés fournit la réponse à ces deux questions d'une manière très simple, à la condition d'abandonner la considération des solutions partielles pour revenir à celle des lieux géométriques.

Ainsi qu'on l'a vu plus haut, le problème revient, en somme, à tracer le mieux possible le cercle enveloppe des cercles de hauteur approchés. En principe, ce cercle doit être également bien déterminé dans tous les sens. Or il faut pour cela que la densité des cercles tangents et par conséquent des étoiles à observer dans une région azimutale donnée soit inversement proportionnelle au *poids* moyen des cercles de hauteur tangents dans cette région. Quant au cercle enveloppe le plus probable, il est déterminé par la condition que $\Sigma P d^2$ soit minimum, P désignant le poids d'un cercle de hauteur approché au point où il devrait être tangent, et d sa plus courte distance au cercle enveloppe. Il suffit donc, pour connaître la répartition

idéale des étoiles à observer dans les diverses régions azimutales et savoir trouver la solution la plus probable, étant donnée une série d'observations dans des azimuts quelconques, d'avoir l'expression du poids d'un cercle de hauteur approché dans le voisinage de son point de contact avec le cercle enveloppe, ou, ce qui revient au même, celle du poids du cercle de hauteur proprement dit correspondant. Car les deux cercles, dont les rayons ne diffèrent que par une constante, ont évidemment même poids aux extrémités d'un même rayon.

L'erreur probable $\delta\zeta$ d'un lieu du zénith correspondant à une erreur probable d'appréciation δt sur le temps du passage, la seule que nous ayons à considérer ici, est égale à δt multipliée par la vitesse zénithale de l'astre, laquelle a pour expression $\sin \lambda \sin Z$, en appelant λ la colatitude et Z l'azimut, et en prenant pour unité la vitesse d'un astre dans l'équateur. On a donc pour $(\delta\zeta)''$ exprimé en secondes d'arc en fonction de $(\delta t)^s$ en secondes de temps :

$$(1) \quad (\delta\zeta)'' = 15 \sin \lambda \sin Z (\delta t)^s.$$

La formule qui donne l'erreur probable du temps du passage d'une étoile derrière un fil dans un instrument méridien est :

$$(\delta t)^s_1 = \pm \sqrt{(0,07)^2 + \left(\frac{3,2}{G \sin \delta}\right)^2};$$

δ désigne la distance polaire de l'étoile; G , le grossissement de l'instrument; $\sin \delta$ est la vitesse azimutale de l'étoile vue à l'œil nu, en prenant toujours pour unité celle d'un astre dans l'équateur; $G \sin \delta$ est cette même vitesse dans l'instrument. La formule peut s'appliquer également aux observations de passages à une hauteur déterminée; il suffit d'y remplacer $\sin \delta$ par la vitesse zénithale $\sin \lambda \sin Z$. On a donc :

$$(2) \quad (\delta t)^s = \pm \sqrt{(0,07)^2 + \left(\frac{3,2}{G \sin \lambda \sin Z}\right)^2}$$

et par suite :

$$(3) \quad (\delta\zeta)'' = \pm 15 \sqrt{(0,07 \sin \lambda \sin Z)^2 + \left(\frac{3,2}{G}\right)^2}.$$

Le carré de l'expression inverse représente le poids cherché.

La méthode des hauteurs égales est ainsi complètement généralisée.

Importance du rôle que joue le grossissement. — La formule (2)

signifie qu'il y a une limite à l'exactitude de l'appréciation du temps d'un passage et que sa valeur probable pour les observations à l'œil et à l'oreille est de $0^s,07$, comme pour les passages au méridien. Elle montre que, pour $\lambda = 90^\circ$ et $Z = \begin{cases} 90^\circ \\ 270^\circ \end{cases}$, c'est-à-dire pour un astre observé à l'équateur et dans le premier vertical, l'erreur probable δt est minimum. Le second terme sous le radical se réduit alors à $\left(\frac{3,2}{G}\right)^2$, et il devient rapidement négligeable vis-à-vis du premier lorsque G augmente. Au point de vue de la *détermination de l'heure*, il n'y a donc pas intérêt, dans ce cas, à dépasser un certain grossissement, celui qui permet pratiquement d'atteindre la précision limite dans l'appréciation du temps du passage.

En dehors de l'équateur, pour obtenir cette même précision dans l'observation des étoiles à l'est et à l'ouest, il faut que le grossissement augmente dans le rapport de 1 à $\frac{1}{\sin \lambda}$. *Les forts grossissements sont donc d'autant plus nécessaires, pour la détermination de l'heure, que l'observateur se trouve plus près du pôle.*

Les cercles de hauteur approchés fournis par les étoiles observables dans le voisinage du premier vertical sont à la fois les plus précis dans le sens est-ouest et ceux qui déterminent le mieux le cercle enveloppe suivant cette direction : c'est pourquoi nous venons de les examiner à part. Quant aux autres, ils contribueront d'autant plus efficacement à la détermination de l'heure, toutes choses égales d'ailleurs, que le grossissement sera plus élevé.

Mais ce qu'il importe de retenir, c'est que, dans tous les cas, *il y a une limite à la précision des cercles de hauteur dans le sens est-ouest* qu'on ne saurait dépasser, quel que soit le grossissement. C'est surtout par le nombre des observations qu'il faut chercher à augmenter la précision dans la détermination de l'heure.

Il en va tout autrement si l'élément à déterminer, au lieu d'être le temps, c'est-à-dire une quantité de même nature que celle qui est observée, est la *colatitude*, qui n'en dépend qu'indirectement. Les cercles de hauteur approchés qui déterminent principalement le cercle enveloppe dans le sens nord-sud et, par conséquent, la colatitude, sont ceux qui proviennent des observations circommériennes, c'est-à-dire pour lesquels Z est voisin de 0° ou de 180° . Le premier terme sous le radical dans la formule (3) devient alors négligeable,

et elle se réduit à :

$$(\delta\zeta)^r = \pm 15 \frac{3,2}{G}.$$

L'erreur probable du cercle de hauteur fourni par l'observation d'une circommérienne est donc inversement proportionnelle au grossissement.

Si l'on fait abstraction des erreurs de position des étoiles et des variations de marche du compteur de temps dans le cours d'une série, on conclut de là que les déterminations de latitude par la méthode des hauteurs égales sont *susceptibles d'une précision illimitée*, à la condition que l'augmentation de grossissement ne soit pas obtenue au prix d'une diminution dans la précision du pointé.

Il convient d'insister un peu sur cette question d'absence de limite de précision dans le cas des circommériennes pour bien marquer les rôles respectifs du compteur de temps et du grossissement. La vitesse zénithale d'un astre étant en secondes d'arc $15 \sin \lambda \sin Z$, si l'erreur probable δt de l'observation du passage à une hauteur déterminée était constante, celle $\delta \zeta$ du cercle de hauteur serait, dans un lieu donné, proportionnelle à $\sin Z$ et, par conséquent, tendrait vers zéro quand on prendrait des étoiles passant de plus en plus près du méridien. Le compteur de temps remplirait ainsi l'office d'un cercle divisé dont la précision de lecture croîtrait en raison inverse de $\sin Z$. Mais l'expression (2) de δt montre que l'erreur probable d'observation augmente quand la vitesse zénithale diminue et que, pour $G = 1$, c'est-à-dire sans grossissement, elle varie sensiblement en raison inverse de la vitesse. Le compteur de temps donne donc, pour les observations à l'œil nu, à peu près la même précision de cercle de hauteur dans tous les azimuts; et il en est de même tant que G n'est pas assez grand pour que le terme $(0,07)^2$ ne soit plus négligeable devant $\left(\frac{3,2}{G \sin \lambda \sin Z}\right)^2$, quel que soit Z . G continuant à croître, l'inégalité de précision entre les cercles de hauteur des étoiles circommériennes et ceux des étoiles orientales ou occidentales s'accuse de plus en plus, la précision des derniers tendant vers une limite tandis que celle des premiers augmente presque proportionnellement à G . Le compteur de temps reprend alors son rôle de cercle divisé à lecture de précision

variable et se rapproche d'autant plus de celui qu'il jouerait, si δt était constant, que G est plus grand.

On voit tout l'intérêt qu'il y a à associer à l'instrument qui sert à noter les heures des passages un instrument de hauteurs égales doué du plus fort grossissement que l'on puisse atteindre sans nuire à la précision du pointé, afin de multiplier le plus possible les vitesses zénithales faibles.

DÉTERMINATION DE LA POSITION DES ASTRES. — Nous n'avons envisagé jusqu'ici qu'une partie du problème de l'astronomie de position, celle qui a pour but de déterminer la position du zénith sur la sphère céleste à une heure donnée du compteur de temps. Quelques mots suffiront pour faire comprendre comment la méthode des hauteurs égales permet de résoudre l'autre partie, celle qui consiste à déterminer la position d'un astre inconnu X .

L'observation du passage de l'astre X est englobée dans une série d'observations d'étoiles connues qui fournit la position Z_0 du zénith à l'heure t_0 du compteur et la distance zénithale vraie ζ_0 ; on en déduit la position Z_x du zénith à l'heure t_x de passage de X , et on a ainsi pour l'heure sidérale T_x , qui correspond à t_x , un lieu géométrique de X qui est le petit cercle décrit de Z_x comme centre avec ζ_x comme rayon.

Si on observe les deux passages à l'est et à l'ouest, on a deux lieux symétriques par rapport au méridien de l'astre. En faisant varier la distance zénithale d'observation, on obtiendra chaque fois un couple de lieux dont l'inclinaison sur le méridien de l'astre sera différente. Enfin, en se déplaçant en latitude, on pourra avoir des lieux orientés dans toutes les directions.

L'erreur probable de chacun des lieux se calcule aisément en fonction de l'erreur probable d'observation, de celles des coordonnées du zénith et de celle de la distance zénithale vraie ζ_x . Connaissant les poids de tous les lieux, on appliquera la méthode des moindres carrés pour avoir la position la plus probable.

Il est essentiel de remarquer que, dans cette détermination aussi bien que dans la précédente, on ne fait pas intervenir la valeur absolue de la réfraction et que seule la dissymétrie de la réfraction par rapport à la verticale peut affecter les résultats. Cette cause d'erreur peut être considérée comme du second ordre, au moins tant que la distance zénithale n'est pas trop grande.

AVANTAGES DE LA MÉTHODE. — La méthode des hauteurs égales

généralisées est la seule qui permette de résoudre le problème de l'astronomie de position dans toute sa généralité. Elle utilise des mesures si l'on suppose la hauteur d'observation rigoureusement invariable, et non l'un des termes d'une mesure. La quantité observée est toujours du temps, ce qui rend les observations beaucoup plus comparables et permet d'assigner à chacune sa véritable erreur probable. Les erreurs redoutables de la réfraction sont presque entièrement éliminées. La méthode fournit non des coordonnées, mais des positions, et donne le moyen de calculer leur précision. Enfin, au point de vue pratique, elle ne comporte que des observations de temps, qui sont beaucoup plus rapides et plus faciles que les lectures de cercles divisés.

Ces avantages la placent au premier rang des méthodes de l'astronomie de position.

II. — ASTROLABE A PRISME.

§ 1. PRINCIPES ESSENTIELS DE L'INSTRUMENT. — 1. *Conditions auxquelles doit satisfaire un instrument de hauteurs égales.* — La longue digression qui précède sur la méthode des hauteurs égales était nécessaire non seulement pour faire comprendre les avantages et l'importance de la méthode, mais encore pour mettre en évidence les conditions indispensables auxquelles doit satisfaire un instrument pour permettre de l'appliquer. Elles sont au nombre de trois principales :

1° La distance zénithale apparente mesurée doit être rigoureusement constante ;

2° Il faut que l'appareil supporte un grossissement élevé ;

3° Enfin, il doit être agencé de manière qu'on puisse observer un grand nombre d'étoiles dans un temps très court.

La première condition est la plus importante : si elle n'est pas remplie, la méthode n'existe plus.

2. *Le sextant employé comme instrument de hauteurs égales.* — *Ses avantages et ses inconvénients.* — Une distance zénithale apparente constante, c'est un angle constant dont l'un des côtés est vertical et l'autre dirigé vers l'astre. Il faut donc un appareil susceptible de mesurer un angle invariable et disposé de manière qu'au moment de l'observation l'angle soit compris dans un plan vertical et reprenne exactement la même position par rapport à la verticale. Il n'existait

jusqu'alors qu'un instrument au moyen duquel cette association d'un angle invariable avec la verticale pouvait être réalisée pour l'observation de distances zénithales égales : c'est le sextant combiné avec l'horizon artificiel à mercure. Aussi bien est-ce pour cet emploi particulier du sextant que Gauss avait imaginé la méthode des hauteurs égales. Si on fixe l'alidade dans une position quelconque, le système des deux miroirs constitue un appareil mesurant un angle constant,

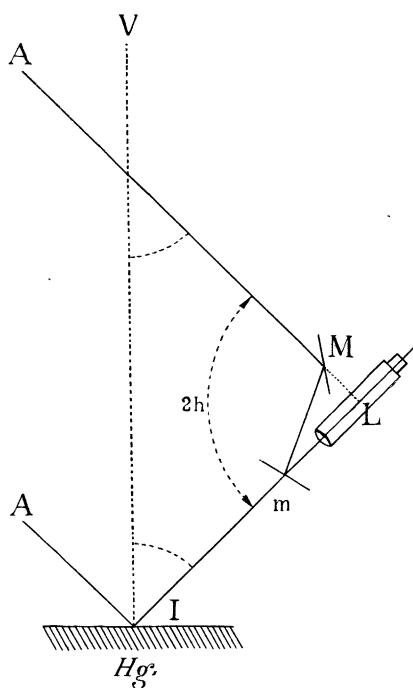


FIG. 2.

le double de celui des miroirs, dans un plan normal à leur intersection. En visant directement l'image d'une étoile dans l'horizon artificiel et l'astre lui-même par double réflexion dans les miroirs M , m (fig. 2), on n'a qu'à amener les images à passer l'une sur l'autre dans le plan vertical passant par l'axe optique de la lunette. Au moment où elles coïncident, l'intersection des deux miroirs est horizontale et, si l'axe optique est normal à cette intersection, celle-ci est perpendiculaire aux directions AM et Im des rayons directs et réfléchis sur le bain de mercure. L'appareil mesure donc bien un angle

constant vertical et toujours disposé de la même manière par rapport à la verticale, puisque ses côtés AM et Im sont également inclinés sur la verticale IV du bain de mercure. Cet angle $2h$ est le double de la hauteur apparente de l'astre à l'instant de la conjonction.

Ce mode d'observation, outre les avantages inhérents à la méthode des hauteurs égales, en présente deux autres très précieux :

1° La vitesse relative des images est double de celle d'une image simple : la précision d'observation est donc la même que celle qu'on aurait en observant le passage au fil horizontal d'une image avec une lunette de *grossissement double* ;

2° La lunette n'a pas besoin de réticule ; l'angle mesuré par les miroirs passant par un maximum ou un minimum lorsque le plan des rayons lumineux est normal à leur intersection, on règle la position de la lunette de manière que la ligne joignant le centre optique de l'objectif au centre du diaphragme placé au foyer soit normale à l'intersection des miroirs, et il suffit alors d'orienter l'instrument de manière que la coïncidence se produise *à peu près au centre du champ*.

Malheureusement, à côté de ces avantages, le sextant présente, au point de vue qui nous occupe, de graves défauts. On peut bien admettre que, au degré de précision que comporte le grossissement de la lunette, l'angle des miroirs reste constant tant que l'instrument est tenu verticalement dans la même position. Mais il n'en serait plus de même si l'on employait des grossissements comme ceux que réclame la méthode des hauteurs égales pour donner une grande précision ; la liaison des miroirs est trop précaire pour qu'on puisse compter sur l'invariabilité de leur angle. En outre, leur monture est très défectueuse : des miroirs même parfaits, lorsqu'ils sont mis en place, sont toujours assez déformés pour n'admettre que des grossissements faibles. Il est donc indispensable de substituer aux deux miroirs séparés un système de faces réfléchissantes absolument solitaires, parfaitement planes et le restant suffisamment pour que, placé dans sa monture, l'appareil supporte de forts grossissements. Ces faces doivent être taillées dans un même bloc de verre ou de métal ; mais alors, au lieu de pouvoir faire varier à volonté la distance zénithale d'observation comme avec le sextant, il faudra un système particulier pour chaque distance zénithale.

3. *Choix de l'appareil de mesure.* — *Le prisme équiangle.* — Quelle est la distance zénithale qu'il convient de choisir si l'on se contente d'un système unique ?

Au point de vue optique, on peut évidemment faire des systèmes correspondant à toutes les distances zénithales de 0° à 90° . Le problème qui consiste à ramener dans la même direction deux faisceaux de rayons parallèles faisant entre eux un angle donné $2h$ ou $360^\circ - 2h$ au moyen de deux réflexions peut être résolu de diverses façons. Au lieu de faire subir les deux réflexions au même faisceau comme dans le sextant, on peut faire réfléchir une fois chaque faisceau : dans les deux cas, l'angle des faces réfléchissantes doit être la moitié de celui des deux faisceaux. On a le choix également pour la nature des faces réfléchissantes : miroirs métalliques ou de verre recouvert d'argenture, prismes à réflexions totales, prismes à réflexions intérieures sur des faces argentées, prismes à une réflexion intérieure et une extérieure. Sans vouloir entrer dans l'étude de cette question qui demanderait de trop longs développements, il nous suffira de dire que les prismes à réflexions intérieures sont les seuls systèmes acceptables, au moins pour des instruments appelés à voyager, les miroirs métalliques ou de verre argenté étant trop sujets à se piquer. Pour éviter la dispersion, les faces d'entrée et de sortie doivent naturellement être disposées de manière que les rayons incidents de chaque faisceau fassent avec la première le même angle que les rayons émergents avec la seconde ; on prend en général l'incidence normale.

De tous les prismes que l'on peut ainsi imaginer pour les diverses distances zénithales, le plus simple et de beaucoup le plus satisfaisant est celui qui a pour section droite un triangle équilatéral ABC (*fig. 3*). Il est du type à réflexions totales. Deux quelconques des faces AB, AC peuvent être prises comme faces réfléchissantes, chacune d'elles servant en même temps de face d'entrée pour le faisceau qui se réfléchit sur l'autre ; la troisième, BC, est la face d'émergence. L'angle A étant de 60° , ce prisme correspond à la hauteur de 60° ou à la distance zénithale de 30° .

Dans sa position normale, la face BC est placée verticalement. La direction commune d'émergence des deux faisceaux au moment de la coïncidence est donc horizontale, et la lunette est placée horizontalement. Grâce à ses propriétés géométriques, le prisme triangulaire équiangle peut être construit avec une grande perfection, comme on le verra plus loin, ce qui facilite beaucoup le réglage.

Au point de vue astronomique, la distance zénithale de 30° qu'il permet d'observer est celle qui convient le mieux pour la détermina-

tion du zénith. Elle marque à peu près la limite qu'il ne faut pas dépasser si l'on ne veut pas avoir à craindre d'erreurs provenant de la dissymétrie de la réfraction par rapport à la verticale; et, d'autre part, elle est suffisante, sauf dans les régions polaires, pour donner à l'observateur un grand nombre d'étoiles bien déterminées parmi lesquelles il peut faire un choix raisonné.

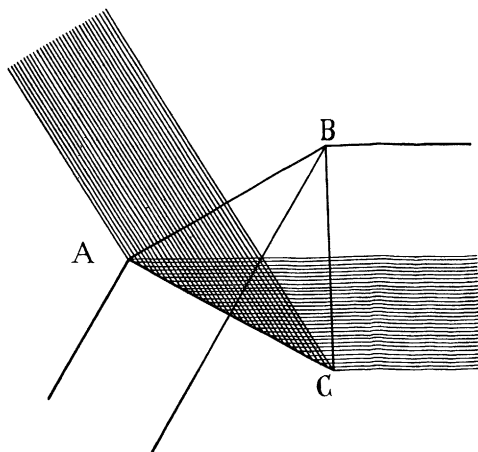


FIG. 3.

Telles sont les raisons qui ont fait donner la préférence au prisme triangulaire équiangle dans l'astrolabe à prisme.

Mais ce n'est pas assez que les faces de ce prisme soient taillées avec une extrême perfection, il faut encore que leur planéité ne soit pas altérée par la monture qui le maintient dans sa position par rapport à la lunette, ou du moins qu'elle le soit si peu que la netteté des images n'en souffre pas, même avec de très forts grossissements. On verra plus loin comment M. Jobin est parvenu à résoudre ce problème dans les instruments qu'il construit.

4. *Grossissement.* — Nous avons dit que l'un des avantages du mode d'observation au sextant et à l'horizon artificiel est de doubler la vitesse zénithale correspondant au grossissement de la lunette, ce qui équivaut à doubler le grossissement de celle-ci. Comme, dans les lunettes à réticule, on ne peut augmenter le grossissement qu'en augmentant la distance focale de l'objectif, puisque,

au delà d'une certaine limite, le grossissement par l'oculaire augmente le diamètre apparent des fils et diminue dans le même rapport la précision des pointés, on peut dire aussi que ce mode d'observation, comparé à celui du passage au fil horizontal dans une lunette à réticule, a pour effet de réduire de près de moitié la longueur de celle-ci pour la même précision.

Le deuxième avantage, l'absence de réticule, permet d'aller encore plus loin dans cette voie; car alors il n'y a plus d'autre limite au grossissement par l'oculaire que celle à partir de laquelle les images cessent de paraître fines. Avec de bons objectifs et en employant comme oculaires des microscopes, on parvient à atteindre, dans des instruments très portatifs, les grossissements des grands instruments d'observatoires, les images, celles des petites étoiles surtout, restant toujours très fines.

3. *Rapidité d'observation.* — *Bain de mercure.* — Nous n'avons pas encore parlé de la rapidité des observations. On ne sera pas étonné d'apprendre que, avec le sextant, elle est extrêmement faible. L'expérience est là pour prouver que les plus habiles observateurs ne peuvent guère prendre plus de cinq à six étoiles dans une soirée. Cela tient sans doute à ce que le nombre des étoiles observables avec cet instrument est très limité, mais aussi et surtout à ce que, à chaque observation, il faut un certain temps pour se préparer : l'observateur doit orienter son horizon à mercure à vue et s'orienter lui-même ensuite dans le vertical où se trouvera l'astre au moment de son passage, ce qui, même avec l'aide d'une boussole, ne laisse pas que de présenter quelque difficulté.

Pour obtenir la rapidité désirable avec la lunette munie de son prisme, il est nécessaire de faire tourner à la fois lunette et bain de mercure pour les diriger dans un azimut quelconque calculé d'avance comme on fait pour la lunette d'un théodolite. Si la chose ne souffre aucune difficulté pour la lunette, elle n'est possible, étant donnée la mobilité des horizons ordinaires à mercure, que si l'on fait usage d'un bain de mercure spécial dérivé du *bain de mercure amalgamé* et qui en diffère principalement par la minceur de la couche de mercure. Les oscillations de cette faible masse de mercure, rendue légèrement pâteuse par l'amalgame et par conséquent un peu moins mobile, sont amorties très rapidement par ce fait que la cuvette de l'horizon, en cuivre rouge amalgamé, est mouillée par le liquide. Cet amortissement est rendu encore plus complet par la forme des bords taillés en

penne très faible et sur lesquels viennent mourir les oscillations comme la houle sur les plages.

L'amortissement est d'autant plus énergique que la couche de mercure est plus mince. Il ne faut cependant pas aller trop loin dans ce sens, autrement on s'exposerait à n'avoir plus une surface horizontale. On reconnaît assez aisément qu'on a dépassé la limite à ce fait que les oscillations deviennent apériodiques. En pratique, il est bon de dépasser un peu l'épaisseur qui correspond à cette limite.

Des expériences exécutées avec deux astrolabes du modèle géodésique de M. Jobin (grossissement 75), disposés de manière à faire autocollimation de l'un sur l'autre par l'intermédiaire du bain de l'un d'eux, ont montré qu'avec une couche de 0^{mm},7 d'épaisseur l'autocollimation n'est pas détruite lorsqu'on fait tourner la cuvette, à la condition que le fond soit parfaitement amalgamé.

§ 2. DESCRIPTION DE L'INSTRUMENT. — Les principes essentiels de l'instrument étant posés, nous allons donner maintenant sa description et celle de ses divers organes.

1. *Description générale de l'instrument.* — Nous prendrons comme type l'astrolabe à prisme modèle géodésique ou moyen modèle de M. Jobin, représenté *fig. 4*, qui est le plus couramment employé.

La lunette AA à prisme C, comportant un axe de rotation *a* avec secteur divisé M et un trépied D, est disposée, ainsi que l'horizon de mercure H, sur une pièce E qui peut tourner autour d'un axe K porté par trois vis calantes L au moyen desquelles il est rendu vertical par l'observation du niveau sphérique *r*.

La lunette étant amenée par rotation autour de *a* dans sa position normale, c'est-à-dire l'index de M étant au zéro, on amène l'aiguille du déclinatoire B fixé sur la lunette dans la direction de la ligne de foi tracée parallèlement à l'axe optique en faisant tourner la pièce E et, par suite, tout le système autour de K. Puis, sans plus toucher à la partie supérieure, on desserre la vis de pression du cercle horizontal N pour le rendre mobile autour de son axe, et on le fait tourner jusqu'à ce que son index marque la déclinaison du lieu si elle est N.-E. et son complément à 360° si elle est N.-O. Le cercle se trouve ainsi orienté. Pour observer une étoile dont on connaît l'azimut Z au moment de son passage au cercle de distance zénithale (30° + réfraction), il suffit alors de faire tourner la pièce E jusqu'à ce que l'index de N marque Z.

Il importe, dans la pratique, de pouvoir corriger l'azimut de la

lunette quelques instants avant la conjonction sans toucher au bain de mercure, qui doit rester immobile jusqu'à la conjonction pour

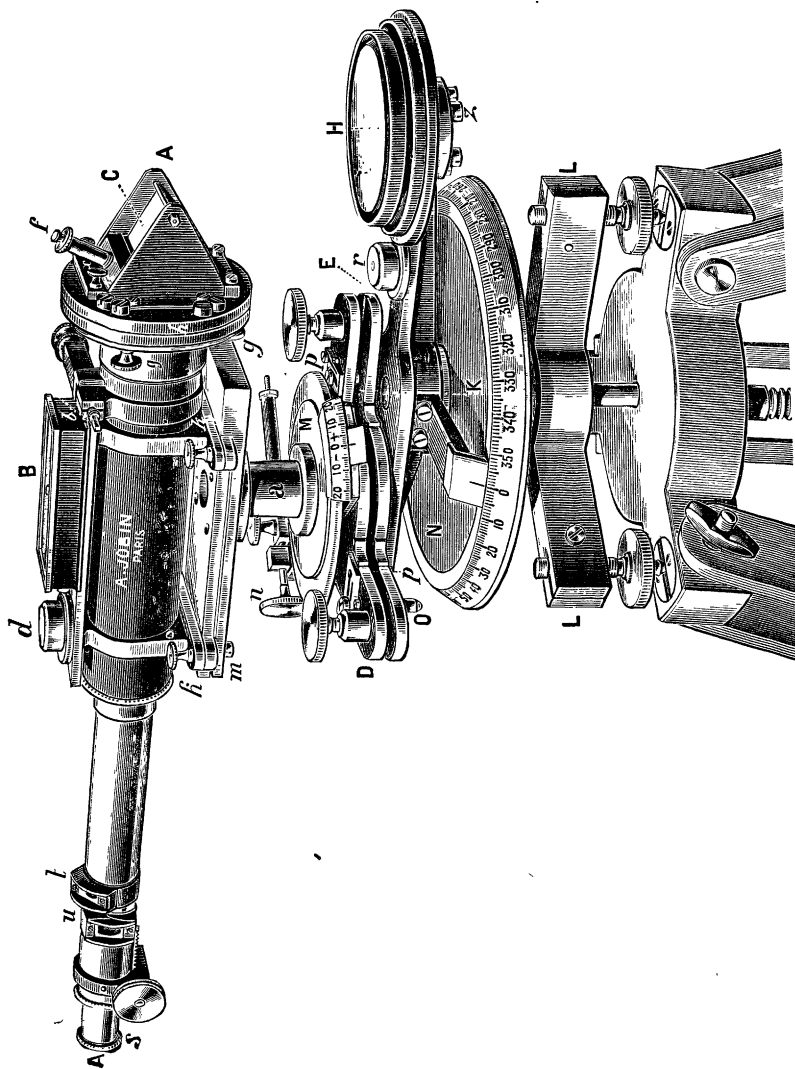


FIG. 4. — Vue d'ensemble de l'appareil.

qu'à ce moment l'image réfléchie soit nette. C'est pourquoi la lunette a été pourvue d'un axe de rotation spécial α avec secteur de cercle

horizontal M, qui permet de lire la correction à apporter à l'azimut primitif marqué par l'index de N.

Lorsque l'instrument est réglé et prêt pour l'observation, la position des divers organes est la suivante :

L'axe optique de la lunette se meut dans un plan horizontal ;

La face du prisme tournée vers l'objectif est normale à l'axe optique ;

Les arêtes du prisme sont horizontales.

Il est bien entendu que ces conditions ne sont nullement nécessaires. La seule qui importe est la perpendicularité de l'axe optique et de l'intersection des deux faces réfléchissantes ; encore suffit-il qu'elle soit réalisée à 2' ou 3' près. Mais il est bon, pour la commodité et la rapidité des observations, que ces conditions soient remplies le mieux possible.

Enfin, pour la stabilité de la surface réfléchissante du bain de mercure, les bords de la cuvette doivent rester dans un plan horizontal.

On a été conduit, pour donner à l'observateur les moyens de réaliser aisément ces conditions de bon fonctionnement, à introduire dans l'appareil un certain nombre de dispositifs de réglage que montre la *fig. 4*. Nous les exposerons en détail au fur et à mesure qu'ils se présenteront dans la description particulière des divers organes.

2. *Lunette*. — Le corps de la lunette est porté par deux colliers munis d'oreilles qui servent à les fixer au moyen des boutons de serrage *k* sur une plaque solidaire de l'axe *a* : il peut ainsi être séparé du reste de l'appareil et remis en place par la manœuvre très simple des boutons de serrage *k*.

Sur la partie supérieure des colliers est fixée une plaque portant la boussole B et le niveau sphérique *d* réglable au moyen de trois vis : la bulle du niveau doit être au centre du cercle tracé sur la glace lorsque l'axe *a* est vertical.

Devant l'objectif de la lunette est disposé le prisme C dont la monture, qui sera décrite plus loin, est fixée à un tube chaussant dans toute la longueur du corps de la lunette. Ce tube porte à l'avant une pièce en équerre placée entre la tête de la vis *l* et la tête d'une pompe à ressort antagoniste. On peut ainsi, en agissant sur le bouton à carré *l*, amener les arêtes du prisme à être horizontales. Ce réglage, qui n'a pas besoin d'une grande exactitude — car on le

parachève à chaque observation — est obtenu une fois pour toutes ; le dispositif ci-dessus, très stable, le maintient suffisamment pour qu'il n'y ait qu'à le vérifier de temps en temps.

On peut faire tourner la lunette autour de l'axe a rapidement à la main, la pince n étant desserrée, ou très lentement avec la vis de rappel, la pince étant serrée. On a ainsi la possibilité d'amener par l'un et l'autre moyen la conjonction des images à se faire dans le plan vertical passant par l'axe optique de la lunette sans ébranler l'horizon de mercure.

Dans sa rotation autour de a , la lunette entraîne le secteur divisé M qui se déplace devant un index fixe. La division s'étend à 20° de part et d'autre du zéro ; elle est marquée \vdash d'un côté et — de l'autre, de manière qu'on lise directement avec son signe la correction à apporter à la lecture du cercle de calage N pour avoir l'azimut de la lunette.

L'axe a est monté sur un trépied D dont les vis calantes occupent les sommets d'un triangle rectangle ayant l'un de ses côtés de l'angle droit dans la direction de la lunette lorsque l'index est au zéro. La vis de l'extrémité avant de ce côté permet de rendre la lunette horizontale sans changer l'inclinaison des arêtes du prisme. La vis D , au contraire, permet de rendre horizontales les arêtes du prisme sans changer l'inclinaison de la lunette. Sa manœuvre est constante en cours d'observation pour amener les images directe et réfléchie à *passer aussi près que possible l'une de l'autre* (condition plus favorable que la conjonction proprement dite pour la précision de l'observation). La lunette étant réglée une fois pour toutes, au moyen du couple de vis m , à avoir son axe optique perpendiculaire à l'axe a , on n'aura presque pas à toucher à l'autre vis.

Le trépied D repose par trait-point-plan sur une contre-partie de même forme fixée à demeure sur la pièce E . Le trépied et sa contre-partie sont rendus solidaires au moyen de deux pompes à ressorts O , O qui font serrage dans deux verrous p , p . En soulevant O avec le doigt et dégageant p , on peut séparer complètement la partie supérieure de l'appareil du reste de l'instrument. On la remet en place par le procédé inverse.

3. *Réticule et oculaires.* — Les images directe et réfléchie se font dans le plan focal de l'objectif, à la hauteur de la fenêtre t où est placé le *réticule*, composé, comme celui du sextant, de quatre fils en croix formant un carré. C'est le centre de ce carré qui, avec le

centre optique de l'objectif, définit l'axe optique de la lunette. Le côté de ce carré, qui est d'environ 5', a été calculé par la condition que, lorsque l'instrument est réglé, l'erreur sur la hauteur simple mesurée soit inférieure à 0",1 pour toute conjonction produite entre les deux fils verticaux.

La fenêtre t peut être masquée ou découverte en faisant tourner la monture qui la couvre. Lorsqu'elle est découverte, on peut, à travers la petite glace de protection, éclairer par côté les fils du réticule qui apparaissent ainsi brillants sur fond noir. Cet éclairage est rendu très pratique par le dispositif suivant :

Une petite lampe à incandescence est placée dans une monture convenable qui se termine par deux jours faisant pince et pouvant se fixer par simple pression sur la fenêtre à éclairer. Une pile sèche se place sur la boussole, où elle est maintenue par un caoutchouc. Un contact à portée de la main de l'observateur (*fig. 5*) permet de produire la lumière au moment voulu. Tous ces éléments, piles, fils, lampes, se trouvent couramment dans le commerce.

A défaut de dispositif électrique, on peut très bien se servir d'une lampe ordinaire pour éclairer le réticule; mais c'est un peu moins commode.

Lorsque le ciel est très noir et, par suite, le champ sombre, il est très utile, pour l'observateur qui attend un passage d'étoiles l'œil à l'oculaire, de pouvoir éclairer les fils de temps en temps pour guider son œil de manière à bien fixer le champ.

Le triple problème qui a été résolu ici, tant par l'adoption de ce système d'éclairage des fils que par l'emploi de microscopes comme oculaires, est le suivant :

- a) Rendre la vision commode ;
- b) Obtenir des grossissements élevés;
- c) Donner la possibilité de rendre à volonté le réticule visible dans le champ sombre à l'aide d'un dispositif simple, de façon à pouvoir amener la conjonction à se faire dans le vertical de l'axe optique de la lunette.

Le microscope de visées qui sert pour l'observation est mis au point par une crémaillère. Il peut recevoir deux oculaires proprement dits donnant, l'un 45, l'autre 75 environ, pour le grossissement total de la lunette dans le modèle géodésique que nous décrivons. Son emploi rend la vision particulièrement commode : les images sont nettes et faciles à voir dans le champ. En outre, le grossissement

peut être poussé sans inconvénient aussi loin que le permettent la puissance et la qualité de l'objectif d'une part, la perfection de la taille du prisme de l'autre : il n'en résulte aucune gêne pour l'observation.

Le réglage de la position du prisme C par rapport à l'axe optique de la lunette s'effectue et se vérifie au moyen d'un *viseur autocollimateur* qui se trouve dans les accessoires de l'instrument. Il se compose d'un objectif de faible grossissement devant lequel est disposée une glace transparente à 45° de l'axe optique. Il fonctionne avec l'un ou l'autre des deux oculaires du microscope de visée.

Lorsqu'on veut s'en servir, on le chausse à la place du microscope de visée en ayant soin de placer la glace réfléchissante à peu près verticalement et tournée vers la droite. Avec la crémaillère, on amène alors cette glace devant la fenêtre u en bonne position pour la suite de l'opération. On met le viseur au point sur les fils du réticule, qu'on éclaire au besoin un moment à l'aide d'une lumière placée devant le prisme de la lunette; puis on dispose devant la fenêtre u une source lumineuse quelconque, le dispositif de lampe électrique décrit plus haut ou, à défaut, une lanterne. Le faisceau qui pénètre par u se réfléchit sur la glace à 45° du viseur et va traverser nécessairement le plan du réticule et l'objectif de la lunette. La lunette étant parfaitement réglée à l'infini, c'est-à-dire les fils du réticule étant exactement dans le plan focal de l'objectif de la lunette, chaque point des fils éclairés envoie un faisceau qui, passant par l'objectif, en sort parallèlement à l'axe optique du faisceau incident, se réfléchit sur la face verticale du prisme, revient passer comme faisceau parallèle à travers l'objectif et forme une image symétrique du point lui-même par rapport à la normale à la surface réfléchissante menée par le centre optique de l'objectif. On voit donc apparaître à côté des fils réels des fils réfléchis qui coïncident avec les fils réels opposés, lorsque l'axe optique est normal à la face verticale du prisme. Si cette coïncidence n'a pas lieu, on la réalise en agissant sur les vis de calage h de la monture du prisme. Le réglage se trouve ainsi effectué.

Cette opération d'autocollimation permet, en outre, de vérifier jusqu'à un certain point la perfection de taille du prisme et le bon fonctionnement de sa monture qui ne doit pas altérer les qualités optiques du prisme nu. En effet, les faisceaux réfléchis en partie une première fois sur la face verticale du prisme traversent néan-

moins cette face et vont se réfléchir totalement sur l'une des faces inclinées et normalement sur l'autre. On a ainsi une triple autocollimation sur les trois faces du prisme, qui fournit par conséquent dans le plan focal de l'objectif trois images du réticule. Leur netteté est une vérification de la planéité des faces. Leur superposition fournit une vérification de la précision avec laquelle a été atteinte la valeur des angles de 60° et le parallélisme des arêtes.

4. *Prisme et monture.* — Le *prisme*, qui est la partie capitale de l'instrument, doit avoir, nous l'avons dit, des faces très planes pour fournir, par réflexion, des images nettes permettant de donner à l'oculaire de forts grossissements. Cette grande planéité s'obtient par les procédés interférentiels. Dans les prismes de M. Jobin, elle est réalisée à moins d'un quart de frange. L'égalité des angles ainsi que le parallélisme des arêtes y sont atteints également avec une très grande précision (à $2''$ près environ), ce qui simplifie et facilite le réglage de l'instrument, qui peut se faire alors par simple autocollimation sur la face verticale, comme on vient de le voir.

La *monture métallique du prisme* le soutient par ses faces. Des flancs de métal mince protègent le prisme du côté de chacune de ses bases. Verticalement, le prisme est adossé contre une rondelle reliée au corps de la lunette par trois vis h avec ressorts antagonistes.

Cette rondelle porte deux pièces d'appui à 60° en métal feutré disposées parallèlement aux deux autres faces du prisme, qu'elles épousent ainsi en laissant à découvert la surface utile pour le passage des rayons lumineux. La pièce d'appui inférieure est fixe. Celle du haut est amovible au moyen de deux boutons x , ce qui permet d'enlever complètement le prisme pour le nettoyer, le retourner, etc. Elle porte une contre-plaque de serrage, feutrée également, qui maintient le prisme par la pression d'une pompe à ressort f .

La position du prisme dans cette monture est très stable, bien que les pressions soient très douces et qu'aucune déformation sensible par pression anormale ne soit à craindre, ainsi qu'on peut le vérifier par autocollimation sur l'appareil lui-même, comme il a été indiqué plus haut.

La plate-forme avec la monture du prisme qu'elle porte est amovible complètement au moyen des trois boutons g . On peut ainsi,

dans les voyages de longue durée, enlever tout le système du prisme sans le sortir de sa monture et le placer dans un gainage spécial où il est mieux à l'abri des accidents. Une fois les travaux commencés sur le terrain, et quand les stations d'observation se succèdent fréquemment, on peut laisser sans inconvénient le prisme en place sur la lunette dont le gainage prévoit cette position du prisme.

Avec les divers organes de la monture du prisme, on peut régler exactement la position de ce dernier. On sait déjà que les vis de calage h servent à rendre la face verticale du prisme normale à l'axe optique de la lunette par un procédé qui est aussi pratique sur le terrain que dans un observatoire.

Le bouton b sert à orienter les arêtes du prisme parallèlement au bain de mercure. Cette opération peut se faire en cours de campagne à l'aide d'un fil à plomb que l'on observe en enlevant l'oculaire et se plaçant à distance convenable. L'axe a étant supposé nivelé, on doit voir les deux tronçons du fil à plomb séparés par l'arête dans le prolongement l'un de l'autre.

On arrive plus rapidement et plus exactement à rendre les arêtes du prisme horizontales en se servant d'une équerre optique que l'on substitue au prisme à 60° de l'appareil pour faire une visée autocollimatrice sur un bain de mercure convenablement disposé. Ce procédé permet de régler en même temps, à l'aide des vis m , l'horizontalité de l'axe optique de la lunette.

5. *Horizon de mercure.* — La cuvette H de l'horizon à mercure est en cuivre rouge. Elle est montée sur un cône ajusté avec soin dans une fourrure conique en bronze portée par la pièce E. L'axe de la fourrure est réglé une fois pour toutes au moyen du système de trois doubles vis s de manière à être parallèle à l'axe K, autour duquel tourne E; en sorte que, K étant nivelé, H le sera aussi, et cela quelle que soit la manière dont on aura engagé le cône de H dans son logement.

Lorsqu'on veut se servir de l'horizon, on verse du mercure dans la cuvette de manière qu'il atteigne les bords sans former de ménisque. L'excès de mercure coule dans la rigole pratiquée autour de la cuvette. On débarrasse la surface des impuretés qui la salissent en passant à plusieurs reprises un tube de verre qu'on fait tourner entre les doigts en l'appuyant sur les bords de la cuvette.

Pendant les observations, l'horizon de mercure est abrité du vent au moyen d'une boîte spéciale en bois noir que l'on chausse sur

l'horizon de mercure en ayant soin d'en orienter convenablement les ouvertures par rapport à l'axe de la lunette dans sa position normale. Ces ouvertures sont disposées de manière à laisser passer les faisceaux incident et réfléchi. L'intérieur de la boîte est étagé par un certain nombre de chicanes, de façon à rendre l'abri plus efficace.

Dans le gainage, le cône de H est mis à l'abri du mercure (gouttes ou vapeurs) au moyen d'un chapeau vissé qui le recouvre entièrement.

6. *Alidade et cercle divisé.* — La pièce E sur laquelle sont disposés, d'un côté, la lunette et ses accessoires, de l'autre l'horizon de mercure, tourne autour de l'axe K. Elle porte à cet effet un long cône qui s'engage dans une contre-partie conique creusée dans une douille en bronze solidaire du trépied L. Un niveau sphérique r , réglable comme d par trois vis, permet de rendre l'axe K vertical.

La douille comporte, outre le cône intérieur, un cône extérieur sur lequel vient se chausser le cercle N divisé en degrés. Ce cercle est mobile sur son cône; il peut être fixé au moyen d'une vis de pince placée entre deux branches du trépied L.

On voit, par cette description, avec quel soin les instruments de M. Jobin sont étudiés dans tous leurs détails et quelles ingénieuses solutions il a su trouver pour toutes les questions qui se posaient encore lorsqu'il a entrepris la construction de l'astrolabe à prisme. Le type qu'il a créé est à ce point complet qu'on peut le considérer comme définitif.

7. *Autres modèles.* — Outre le modèle géodésique décrit ci-dessus, M. Jobin construit deux autres modèles, le grand et le petit, qui ne diffèrent du premier que par leurs dimensions et par quelques détails de construction.

Le *grand modèle* (*fig. 5*) a une ouverture d'objectif de 61 millimètres au lieu de 45 millimètres, qui est celle du modèle géodésique; son grossissement est le double, 150 au lieu de 75. Il porte deux niveaux à fioles cylindriques réglables. Trois loquets à ressort qu'on engage ou qu'on dégage par rotation au moyen d'une manette remplacent les deux verrous p et les deux loquets O. Le grand prisme est maintenu par deux pompes f .

Dans le *petit modèle*, l'ouverture de l'objectif n'est que de 22 millimètres; le grossissement, 30. Les organes essentiels sont les mêmes que ceux du modèle géodésique, avec toutefois quelques

simplifications qu'ont permis, d'une part le grossissement plus faible, d'autre part une recherche proportionnellement moins précise des réglages.

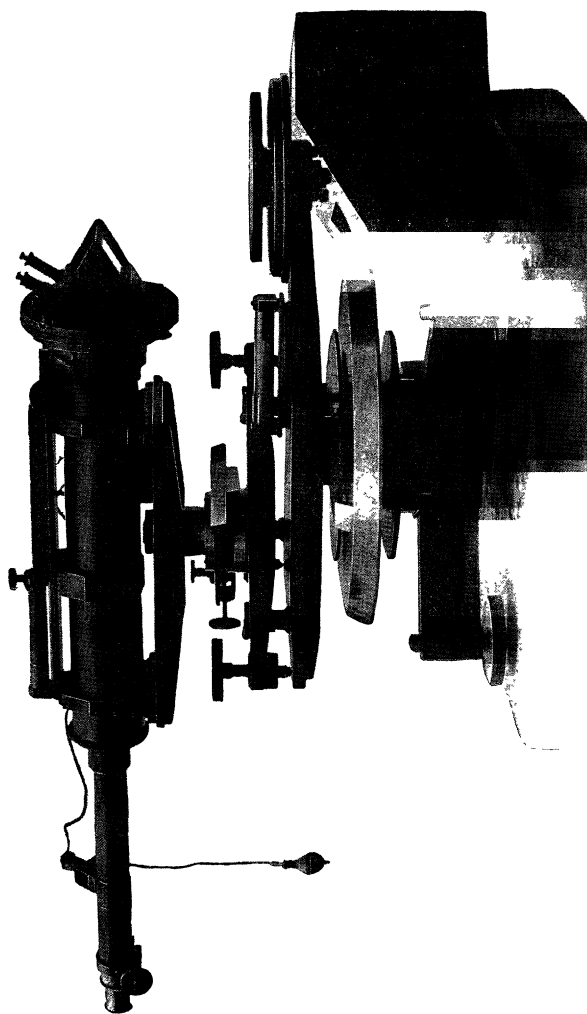


Fig. 3.

Les axes a et K ne sont pas distincts; l'appareil n'a qu'un axe avec deux portées: la portée supérieure autour de laquelle peut tourner la lunette seule, la pince n étant desserrée; la portée inférieure, autour de laquelle peut tourner l'alidade E et, par suite, l'hor-

zon H. En serrant n , on rend la lunette solidaire de E et de H dans le mouvement de rotation autour de l'axe.

Le trépied intermédiaire D est supprimé. La manœuvre de la vis D pour rendre les arêtes du prisme horizontales en cours d'observation est remplacée par celle de la vis b , qui est ici tout à fait à portée de la main.

§ 3. PRÉPARATION DES OBSERVATIONS. — MISE EN STATION DE L'INSTRUMENT. — PROCÉDÉ D'OBSERVATION. — Nous ne répéterons pas ce que nous avons dit ailleurs ⁽¹⁾ sur la *préparation des observations*. Rappelons seulement que le travail est très simplifié par l'emploi d'un *abaque à transparent*, qui donne à vue l'angle horaire et l'azimut d'une étoile au moment de son passage au cercle de 30° de distance zénithale en fonction de sa distance polaire et de la latitude du lieu. Deux *nomogrammes* à points alignés qui donnent l'azimut d'une circommérienne en fonction des mêmes éléments complètent heureusement cet abaque ⁽²⁾.

Enfin un *Catalogue d'étoiles brillantes* ⁽³⁾ comprenant 3800 étoiles a été dressé par le regretté M. Bossert, astronome à l'Observatoire de Paris, pour l'usage spécial de l'astrolabe. Les étoiles y sont rangées par distances polaires croissantes de degré en degré et, dans chaque degré, par ordre d'ascensions droites.

Tous les instruments, même le grand modèle, se montent sur un pied à trois branches. La *mise en station* consiste à niveler les deux axes, à préparer le bain de mercure et à orienter le cercle N de calage. Si le fond de la cuvette est bien amalgamé, l'opération ne prend pas plus de cinq minutes. L'orientation de N s'obtient d'abord, comme il a été dit, approximativement avec la boussole B et s'achève par l'observation d'une étoile d'azimut connu.

L'*observation* consiste, comme avec le sextant et l'horizon artificiel, à amener les images directe et réfléchie à passer entre les deux fils verticaux, l'une à côté de l'autre, juste assez près pour que les images restent distinctes. La manœuvre combinée des vis n et D (celle de la première pouvant être remplacée par la manœuvre de la lunette à la main) permet d'y arriver aisément. On note l'heure à laquelle les images sont à la même hauteur. La lunette restant hori-

(1) Voir *Revue générale des Sciences* du 30 décembre 1905, p. 1079.

(2) L'abaque et les nomogrammes de préparation sont en vente au Service hydrographique sous les numéros S. H. 27, 27 bis et 27 ter.

(3) Gauthier-Villars, éditeur.

zontale, l'observateur peut s'asseoir et suivre ainsi commodément la marche des images en hauteur. Une minute suffit pour observer une étoile à marche rapide. Avec une liste de calages assez complète, on peut observer en une heure une quarantaine d'étoiles.

§ 4. PRÉCISION DES RÉSULTATS. — L'erreur probable du cercle de hauteur d'une *circumméridienne* calculée avec la formule (3) pour le grossissement effectif $G = 75 \times 2 = 150$ du modèle géodésique est $\pm 0'',32$. Elle descend à $+ 0'',16$ pour le grand modèle, et elle n'est encore que de $\pm 0'',80$ pour le petit.

L'observation d'une étoile horaire à l'équateur a pour erreur probable $\pm 0^s,07$, $\pm 0^s,07$ et $\pm 0^s,09$ avec le grand, le moyen et le petit modèle d'après la formule (2).

Ces chiffres représentent assez exactement les erreurs probables réelles, comme on peut s'en rendre compte en comparant les écarts par rapport au cercle enveloppe des cercles de hauteur donnés par l'observation d'une même étoile à différents soirs. A cause des erreurs de position des étoiles, les écarts par rapport au cercle enveloppe des cercles de hauteur approchés provenant des diverses étoiles d'une même série sont notablement plus grands, et les erreurs probables absolues sont plus fortes que celles qui résultent des formules (2) et (3).

En fait, lorsque les étoiles sont choisies de manière à bien déterminer le cercle enveloppe dans tous les sens, les différentes valeurs de la colatitude obtenues avec des séries d'une heure à l'astrolabe du modèle géodésique par un bon observateur ne diffèrent guère de plus de $0^s,3$ à $0^s,4$. Partant de cette concordance, on peut en conclure que, abstraction faite de l'équation personnelle, l'erreur sur l'heure fournie en même temps par chaque série ne dépasse

$$\text{pas } \frac{0^s,03}{\sin \lambda}.$$

Dans la détermination de la différence de longitude Paris-Brest, qui a été exécutée par l'Observatoire du Bureau des longitudes en avril 1906, les observateurs étaient doublés à chaque station. La comparaison des heures obtenues par les deux observateurs d'une même station à chaque série fournira, au sujet de la précision avec laquelle l'instrument permet de déterminer l'heure, des données encore plus certaines. Les calculs de cette opération sont aujourd'hui entièrement terminés, et les résultats définitifs pourront être donnés prochainement.

Enfin, l'observation du passage de la lune dans les régions équatoriales fournit la longitude absolue avec une précision tout à fait comparable à celles que donne l'observation des occultations. Les nombreux résultats obtenus dans les opérations de délimitation du Congo et du Kameroun par MM. Mailles et Dardignac, de la mission Moll, et par M. l'ingénieur Michel, de la mission Cottés, sont à cet égard des plus concluants.

On voit que l'astrolabe à prisme du type Jobin est digne de porter le nom d'instrument de hauteurs égales, puisque, aussi bien en pratique qu'en théorie, il réalise les promesses de la méthode des hauteurs égales généralisée.
