

PAUL COUTEAU

L'OBSERVATION
DES
ÉTOILES DOUBLES
VISUELLES



FLAMMARION
SCIENCES HUMAINES

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE

AVANT-PROPOS

CHAPITRE PREMIER. — Historique

- Les étoiles doubles dans l'Univers
- Les précurseurs : Herschel père et fils
- Les premiers modernes : Struve père et fils
- L'ère des grands pionniers
- Les prospections modernes
- Recherches dans l'hémisphère Sud
- Les étoiles doubles découvertes par la photographie
- Les étoiles doubles à grand mouvement propre commun
- Quelques grands observateurs d'étoiles doubles
- La centralisation des mesures
- Physionomie de l'ensemble des couples connus

CHAPITRE II. — Notions d'optique à l'usage des observateurs d'étoiles doubles

- L'instrument le plus utilisé. La lunette
- Grossissements. Cercle oculaire
- Image donnée par un objectif circulaire. Pouvoir séparateur. Grossissement résolvant. Grossissement utile
- Structure de l'image d'une étoile double serrée
- Clarté

CHAPITRE III. — Les appareils de mesures

- Mesures visuelles
 - Principe de la mesure d'une étoile double
 - Précautions à prendre pour repérer l'origine des angles
 - Les micromètres à fils
 - Les micromètres à étoiles de comparaison
 - Les micromètres interférentiels. Le micromètre de Fizeau-Michelson
 - Le micromètre interférentiel à demi-onde
 - Le micromètre à double image de Paul Muller
 - Le micromètre à double image de B. Lyot et H. Camichel
- L'observation photographique des étoiles doubles
 - Chambre optique à photons
 - Chambre optique à électrons
- L'interférométrie moderne
 - Interféromètre automatique de W. C. Wickes
 - Interféromètre à comptage de photons de A. Labeyrie
 - Interféromètre à intensité de R. H. Brown
- Observation des étoiles doubles par occultations
- Observation des étoiles doubles par balayage photoélectrique de l'image

CHAPITRE IV. — Quelques conseils pratiques

- Préparation de la nuit d'observation
- Précautions à prendre vis-à-vis de la lunette
- La turbulence atmosphérique
- Pratique de l'observation visuelle des étoiles doubles
- Observation d'objets célestes artificiels

CHAPITRE V. -- L'identification des étoiles

- Difficultés de l'identification des étoiles
- Les catalogues fondamentaux
- Les catalogues intermédiaires
- Les catalogues généraux
 - Le catalogue d'Argelander
 - Pratique du repérage des étoiles BD
 - Pratique du repérage des étoiles de la Carte du Ciel
- Catalogues spéciaux

CHAPITRE VI. — Calcul des orbites et des masses stellaires

- But de l'observation des étoiles doubles
- Orbite réelle
- Orbite apparente
- Calcul des éléments d'une orbite d'étoile double
 - Méthode géométrique
 - Méthode de Thiele-Innes-van den Bos
 - Méthode des points opposés ou de Danjon
 - Corrections différentielles des éléments
- Calcul des masses d'étoiles
 - Rapport des masses par les vitesses radiales
 - Rapport des masses par la photographie
 - Tableau des masses
- Les parallaxes dynamiques
 - Applications

CHAPITRE VII . — Voyage au pays des étoiles doubles

- Quelques systèmes typiques
- Intérêt du voyage en fonction de l'instrument
- Pénétration céleste d'un instrument
- Nombre d'orbites accessibles à un instrument
- Performances de l'oeil comparé à ses concurrents
- Le voyage des astronomes niçois à bord d'un vaisseau spatial économique
- Triage des étoiles doubles nouvelles en géantes et naines
- Temps de révolution probable d'une étoile double
- La pérennité des observations. Appel aux monastères

CHAPITRE VIII. — Catalogue de 744 étoiles doubles pour instruments de toutes dimensions

- Pourquoi un catalogue?
- Description du catalogue
- Conseils aux observateurs
- Le catalogue
- Notes

Il existe des hommes qui passent leur vie à regarder et observer des étoiles avec « de longues lunettes à faire peur aux gens ». Ce sont les astronomes. Paul Couteau est l'un d'eux, il a déjà passé plus d'un quart de siècle à regarder des étoiles la nuit. Pourquoi? Comment?

C'est une histoire passionnante racontée dans ce livre destiné à tous les amateurs des choses du Ciel. Le lecteur y trouvera tout ce qui l'intéresse sur cette partie de l'astronomie, encore à la portée des moyens d'un simple particulier : l'histoire de grands pionniers américains et européens, quelques notions simples sur les instruments et les appareils de mesure, des conseils destinés à ceux qui mettent d'oeil à l'oculaire et qui sont parfois rebutés par la difficulté insoupçonnée d'une observation.

Le lecteur plus exigeant aura sous les yeux les éléments nécessaires pour identifier sans carte les milliers d'étoiles accessibles à une petite lunette et pour calculer les orbites et, éventuellement, les masses des étoiles. Il pourra participer, selon son instrument, au grand voyage au pays des étoiles doubles, là-bas à 300 années de lumière, il suivra l'élaboration de recherches amenant des découvertes. Il verra défiler les soleils rouges, jaunes ou bleus, les systèmes colorés géants et nains.

Son imagination l'emportera sur des planètes qui ne connaissent pas la nuit, où des journées rouge rubis succèdent à des journées bleu électrique, où les saisons sont multiples, où la vie prospère peut-être. Le catalogue, à la fin de l'ouvrage, lui donnera un choix surabondant de spectacles célestes de toute beauté, quel que soit l'instrument dont il dispose.

Paul Couteau. né le 31 décembre 1923 à La Roche sur-Yon, envisage la carrière astronomique dès l'âge de onze ans. Après sa licence d'enseignement des mathématiques. il entre à l'Institut d'astrophysique de Paris Sous la direction d'Evry Schatzmann, il entreprend, sur les étoiles naines blanches, des recherches, qui aboutissent à sa thèse de doctorat d'État en sciences physiques soutenue en Sorbonne (1956).

Chargé à Nice, comme astronome adjoint (1959), de la rénovation des moyens d'observation, il met en service, grâce à Jean-Claude Pecker, deux grandes lunettes. dont celle de 76 cm, la quatrième du monde. Il a été invité pendant un an à l'université de Chicago (1961). et a été président (1967-1970) de la Commission des étoiles doubles à l'Union astronomique internationale. Il a observé plus de cent mille étoiles, découvrant près de deux mille systèmes, a calculé de nombreuses orbites, il enseigne ses méthodes à l'université de Nice.

Astronome titulaire depuis 1969, il crée le Centre d'étoiles doubles de l'observatoire de Nice (1973). Il a publié une centaine de mémoires et plusieurs ouvrages en collaboration.

Il est marié et père d'une famille de six enfants. Ses distractions favorites sont le ping-pong et le cyclisme.

L'OBSERVATION
DES ÉTOILES DOUBLES
VISUELLES

Ouvrage publié **PAUL COUTEAU**

Astronome titulaire

L'OBSERVATION
DES
ÉTOILES DOUBLES
VISUELLES

suivie d'un catalogue de 744 étoiles doubles
pour tous instruments

Préface de Jean-Claude PECKER
FLAMMARION
avec le concours du C.N.R.S.

PRÉFACE

Une préface a ce mérite, immense et rare, de laisser au préfacier, même si c'est un ami de l'auteur, le droit reconnu de se livrer aux libertés d'une page d'écriture sans contrôle, d'un marteau sans maître, d'une esquisse sans projet — sinon celui de présenter librement un ouvrage lu avec sympathie, et de faire passer quelques idées complémentaires — non incluses dans le livre. Cette préface sera donc, aussi et surtout, un appel.

L'ouvrage de Paul Couteau parcourt d'abord l'histoire de la découverte et de la mesure des étoiles doubles visuelles, depuis Hershel, qui reconnut le premier l'existence du mouvement orbital d'un membre du couple autour de l'autre étoile — jusqu'aux derniers observateurs contemporains, trop rares... Après avoir exposé les éléments d'optique classique, de théorie de la diffraction et du pouvoir de séparation, nécessaires à la compréhension du problème posé, l'auteur présente les appareils de mesures et donne un aperçu des « recettes » pratiques qui, seules, permettent de donner à une méthode a priori abstraite et impersonnelle, les voies vers un véritable succès, et vers une accumulation de résultats utilisables. Les problèmes d'identification, en particulier, sont difficiles ; que d'erreurs ne commettent pas à cause de ce seul fait, les observateurs novices, ou livrés à eux-mêmes...

Le chapitre VI — calcul des orbites et des masses stellaires — donne à l'ouvrage sa signification profonde. Il ne s'agit pas seulement d'accumuler des mesures, sur des années (les périodes atteignent des dizaines d'années, dépassent parfois le siècle). Il s'agit aussi d'utiliser les ressources combinées de la trigonométrie, de la mécanique céleste, et même de la spectrographie (vitesses radiales mesurées par effet Doppler Fizeau de déplacement des raies spectrales), pour calculer les orbites, toutes leurs caractéristiques (période, grandeur des axes, ellipticité, inclinaison du plan de l'orbite sur la direction de visée, position des noeuds, etc.), et surtout pour utiliser les lois de Képler à la détermination des masses stellaires. On sait que les seules masses stellaires correctement déterminées proviennent de ce genre de travaux; or elles constituent la base de l'étalonnage nécessaire de toutes les masses stellaires — et des masses galactiques — de l'Univers. Le voisinage du Soleil est une région où se calibrent toutes les lois, où s'établit la valeur des étalons, où se déterminent toutes les méthodes d'exploration de l'Univers le plus lointain... On voit que ces observations, qui peuvent paraître dures et longues, restent un élément essentiel de l'astronomie et de l'astrophysique d'aujourd'hui.

Enfin, dans un dernier chapitre (et dans le catalogue remarquable qui en constitue en quelque sorte la conclusion), l'auteur nous fait faire un voyage au pays des étoiles doubles, basé sur les résultats des observations des siècles et des années passés.

L'ouvrage présenté, j'aimerais rappeler les souvenirs personnels qui m'ont mis en contact, voici plus d'un quart de siècle, avec son auteur.

Paul Couteau ne m'en voudra pas, j'espère, si je rappelle ces quelques souvenirs. Cette évocation n'a en fait d'autre but que de répondre à la question : comment devient-on observateur d'étoiles doubles? Paul Couteau, muni d'une solide formation universitaire de physicien, et attiré vers l'astrophysique par l'expérience d'amateur astronome qu'il poursuivait depuis sa jeunesse sous le ciel (plus ensoleillé et clair qu'on ne le croit généralement) de la Vendée, entra, peu d'années après moi, et dans le même laboratoire, celui d'Evry Schatzman, à l'Institut d'Astrophysique du C.N.R.S. Il travailla, à l'époque, sur un sujet de thèse qui combinait les intérêts de Schatzman, et ce que j'avais proposé dans ma propre thèse, non encore soutenue, comme application moderne du mécanisme de Schuster à la formation des raies d'émission : comment expliquer les raies d'absorption de la naine blanche AC + 70"8247? L'hypothèse de travail était qu'il s'agissait non de raies d'absorption non identifiées, mais d'un intervalle entre des raies de l'hydrogène en émission — ces raies de Balmer qu'on s'étonnait à cette époque de ne pas observer en absorption comme dans toutes les autres naines blanches. Paul Couteau parvint à montrer que, pour obtenir de l'effet Schuster les intensités d'émission voulues, il fallait des températures effectives de plusieurs centaines de milliers de degrés à des gravités supposées très élevées. Certes cette solution préfigurait les températures élevées trouvées aujourd'hui pour les noyaux des nébuleuses planétaires, mais elle posait bien d'autres problèmes; de plus on devait arriver plus tard, grâce aux progrès ultérieurs de la spectrographie, à identifier clairement les raies de l'étoile en question; et plusieurs années après la soutenance de thèse de Paul Couteau, son hypothèse de travail était, comme mille autres en astrophysique, revenue au rang de celles qui ont eu un intérêt «historique».

Puis Paul Couteau nous quitta. Un poste vacant devait être occupé à l'observatoire de Nice. Très carrément, André Danjon, alors Président du Conseil des Observatoires, dit à Couteau : « Voulez-vous ce poste? Vous l'avez... Mais attention; à Nice les conditions sont dures; vous serez presque seul, isolé à coup sûr, et j'attends de vous que vous utilisiez le petit équatorial pour étudier les étoiles doubles. On en a besoin. » Paul Couteau, que n'effrayait en rien la mobilité et que l'entrée dans un domaine qu'il ne connaissait que peu séduisait plutôt, prit le taureau par les cornes, et sans fioritures ou exigences inutiles, il partit pour Nice, avec armes et bagages, seul — vendéen projeté dans les Alpes-Maritimes, dans les bois d'oliviers du Mont-Gros, et dans l'atmosphère de doux laisser-aller qui envahissait progressivement les collines encore boisées d'un observatoire en décrépitude.

Certes, il se fit là-bas des amis, parmi ses collègues, et ailleurs; et il y établit une nombreuse famille — dans des circonstances parfois tragi-comiques.

Mais enfin, il fit marcher le petit équatorial (devenu depuis équatorial Charlois) et sut le perfectionner, l'entretenir, avec les moyens du bord, et fort peu d'aide. Avec cet instrument, il observa de nombreuses étoiles doubles connues, en découvrit de nouvelles, détermina des orbites, calcula les éléments de ces orbites (à l'aide d'une antique machine à calcul à manivelle) et, bientôt connu dans le cercle mondial des observateurs d'étoiles doubles, il était considéré comme un pair par les Van den Bos, Van Biesbroeck, Luyten ou Jonkheere — pour ne parler que des disparus (les autres sont évoqués dans le chapitre I du livre). Il devint, encore fort jeune, Président de la Commission des Étoiles doubles de l'Union astronomique internationale, et reste l'un des observateurs d'étoiles doubles les plus actifs du monde.

Je devais retrouver Paul Couteau lorsque, devenu moi-même Directeur de l'observatoire de Nice, en 1962, j'eus la chance de bénéficier de concours financiers suffisants pour donner à cette branche de la recherche, et à Couteau en particulier, la possibilité d'utiliser aussi la grande lunette, entièrement remise à neuf, de l'observatoire de Nice, en plus de l'équatorial Charlois, d'ailleurs complètement rénové lui aussi à la même époque.

Depuis cette période, comme avant, une activité inlassable d'observateur a conduit Paul Couteau à ce livre, une somme de son oeuvre de trente années. Les étoiles doubles, certes, ne constituent pas l'un des domaines de la science astronomique les plus « en pointe » aux yeux de la plupart des astronomes. Et trop de jeunes chercheurs, rarement sollicités de s'y adonner, s'en détournent au contraire vers ce qui donne des thèses plus rapides — vers le rendement... Or peu d'astrophysiciens sont conscients de ce que représentent les quelques masses stellaires qu'on utilise. Il est bien vrai qu'ils utilisent rarement des masses obtenues au moyen de l'analyse directe d'une orbite; la plupart du temps, c'est l'application de la relation masse-luminosité qui est la source de leurs données. Mais ils ne devraient pas oublier que celle-ci, si elle est (à peu près) justifiée par des arguments théoriques, ne peut être étalonnée, en réalité, qu'à l'aide des mesures directes d'étoiles doubles! Souvent, on l'a dit, il faut des dizaines d'années d'observations pour achever la détermination sérieuse d'une orbite, d'une masse stellaire. Mais ces années sont des années d'un travail fondamental, essentiel.

Et si j'ai rappelé cette histoire exemplaire, c'est pour tenter de convaincre nos jeunes chercheurs, ceux en tous cas qui se sentent plus à l'aise en face d'un instrument qu'en face d'un ordinateur, et aussi sans doute de nombreux astronomes amateurs, de se tourner à nouveau vers ce domaine important, et délaissé. Quelques grands observateurs d'étoiles doubles sont encore actifs; leurs rangs s'éclaircissent; Paul Couteau appartient à la génération la plus jeune; la relève n'est pas assurée; et pourtant, il s'agit là d'un des domaines les plus nécessaires de l'observation — ce qui constitue (avec la détermination des parallaxes, des mouvements propres...) « l'astrométrie équatoriale ». Comme je voudrais que mon appel soit entendu!...

La meilleure introduction à ce domaine, pour ces observateurs potentiels est le livre de Paul Couteau : il présente, dans leur cadre astrophysique plus général, l'état actuel des travaux sur les étoiles doubles. C'est un livre fort, simple, clair, direct. Un ouvrage que beaucoup de jeunes devraient méditer; et cela dans la mesure même où se perdent souvent ces qualités d'acharnement qui faisaient, il y a un siècle, que de nombreux astronomes consacraient leur vie à une grande oeuvre, à la mise au point d'un catalogue, à l'exploitation d'une technique... Travail, disait-on, de bénédictin... Travail d'astronome, au sens le plus élevé du terme, celui qui, tous les soirs, ramène dans sa coupole l'observateur, devant les mêmes étoiles, à faire des dizaines de fois les mêmes mesures, fastidieuses et exaltantes... pendant des dizaines d'années, chaque fois que le ciel est pur... Qui le ramène dans sa coupole, ouverte sur l'infini de la nuit, seul avec son micromètre, ses oculaires, ses tables, sa pendule de temps sidéral, et son carnet qu'il éclaire d'une faible lampe de poche pour noter les mesures... Qui le ramène dans sa coupole ouverte sur l'infini de la nuit étoilée, avec son bonnet de laine, ses moufles malcommodes, son pantalon matelassé. Tout seul avec son oeil émerveillé d'astronome...

Jean-Claude PECKER
Membre de l'Institut
Professeur au Collège de France

AVANT-PROPOS

Ce livre s'adresse à tous ceux qui aiment l'astronomie et qui s'intéressent particulièrement à l'observation des étoiles doubles. Il s'adresse aussi bien au jeune amateur débutant qui vient de se voir offrir une petite lunette, qu'au jeune assistant d'observatoire qui s'essaie dans plusieurs disciplines avant de fixer son choix, qu'à l'astronome de métier qui y trouvera des données précises et remises à jour.

Il est donc accessible à tout le monde. C'est l'ouvrage que j'aurais voulu lire lorsque je me suis orienté vers l'étude de ce genre d'étoiles en 1951. On a beaucoup écrit sur ces objets, mais il manquait en France, malgré de nombreux articles, un livre de base. De sorte qu'il était difficile, pour un débutant dans le métier, d'avoir une idée claire de l'état d'avancement de ce genre de recherche.

L'observation des étoiles doubles est riche d'attraits, aussi bien pour l'amateur du ciel par le spectacle qu'elles offrent, que pour le professionnel par les problèmes qu'elles posent. Pour faire naître des vocations, il faut communiquer sa passion, donc enseigner le cheminement de sa recherche et son aboutissement en une synthèse, nouveau point de départ. C'est le but de ce livre.

Il ne ressemble pas tout à fait aux autres, il n'a pas la prétention d'être complet; il expose, en termes simples, le fruit de mon expérience d'un quart de siècle d'observations et de recherches.

C'est à André Danjon, alors Directeur de l'observatoire de Paris, que je dois mon orientation vers les étoiles doubles. Il fallait redonner vie aux vieux, mais puissants, équatoriaux niçois un peu abandonnés pendant la guerre. La gigantesque lunette de dix-huit mètres, la quatrième du monde, que je connaissais grâce aux ouvrages de l'abbé Moreux, faisait depuis longtemps mon admiration. Quand on lit ce que C. Flammarion écrivait en 1882 sur les lunettes de 108mm qui : « Permettent de vérifier de visu presque toutes les découvertes de l'Astronomie moderne », que dire alors de la grande lunette de Nice sept fois plus grande!

Cet instrument, qui m'était déjà familier, était là à m'attendre et, grâce à lui, je sentais que je pouvais réaliser un rêve d'enfance : voir des astres que personne n'avait encore vus.

J'eus la chance d'être initié par R. Jonckheere, le dernier pionnier encore actif du début du siècle, d'avoir en exemple les deux autres Paul de l'astronomie des étoiles doubles : Paul Baize et Paul Muller. La chance a continué, car j'avais à ma disposition une des quatre lunettes françaises de 38cm, remplacée au bout de quelques années par celle de 50cm dont l'objectif est dû à la perspicacité d'André Danjon. Enfin en 1969, la restauration complète de la grande lunette, grâce à Jean-Claude Pecker, achève la réalisation du rêve.

Le livre est divisé en huit parties. Chacune traite d'un sujet bien particulier où on suppose que le lecteur ignore la matière des chapitres précédents. On trouve une bibliographie restreinte à la fin de chaque partie.

L'observation des étoiles doubles est une question de personnes, aussi l'histoire de la spécialité est importante pour comprendre son processus actuel. C'est le premier chapitre.

On trouvera ensuite quelques notions d'optique très simples, mais facilement perdues de vue. On n'observe pas une étoile double comme une planète ou une étoile variable. Comment voit-on une étoile double à composantes très rapprochées? La physiologie de l'observateur et la théorie des images doivent produire un heureux résultat, une bonne composition. Tout le problème des masses en dépend.

Les différents appareils de mesures sont étudiés. Du moins ceux qui servent ou ont servi. On insiste sur le micromètre à fils, responsable de 90 % des mesures, dont le principe est vieux de plusieurs siècles. On décrit quelque peu les techniques d'interférométrie moderne et d'occultation qui ouvrent des perspectives révolutionnaires.

Je m'étends ensuite sur la pratique de l'observation : la préparation de la nuit, les précautions à prendre vis-à-vis de la monture, la lutte sournoise contre la dégradation des images par l'atmosphère, les gestes à faire ou ne pas faire.

L'identification des étoiles fait l'objet d'un chapitre complet. C'est une technique en voie de disparition, comme les observations visuelles. Certes les astronomes sont habitués à repérer les objets sur un cliché où il s'en trouve des centaines. Mais le problème du repérage d'une étoile unique, vue à l'oculaire, est différent. Cela concerne toute l'histoire des Catalogues stellaires que je schématise au mieux.

Le chapitre classique du calcul des orbites et des masses s'adresse surtout aux étudiants. Je ne décris

que trois méthodes de calculs d'orbite dont une, expéditive, fournit les éléments orbitaux en quelques minutes. On trouvera le tableau des masses, soigneusement remis à jour, avec références. Le chapitre se termine par le calcul des parallaxes dynamiques. J'insiste sur le fait que je n'ai pas cherché à être complet, mais homogène, l'ouvrage serait trop long. Les calculs font appel à des notions simples de mécanique céleste. Le lecteur y trouvera rassemblé et unifié, pour la première fois en France, tout ce qui est indispensable au calcul des masses stellaires individuelles, depuis le calcul des orbites d'après les observations, jusqu'à celui du mouvement parallactique et du centre des masses. A chaque fois des exemples numériques montrent la marche à suivre.

Ces notions classiques sont utilisées pour la suite, plus originale, où est décrit le voyage au pays des étoiles doubles. J'y expose les recherches que j'entreprends à Nice et les résultats, sous une forme imagée accessible à ceux qui ont des connaissances élémentaires en astronomie et en mathématiques. Même le lecteur, simplement curieux, lira et comprendra comment s'organise une recherche. Où se trouvent les étoiles doubles? Comment sont-elles vues par les habitants de ces systèmes? Jusqu'où voit-on avec une lunette? Je réponds en décrivant ce que nous avons fait à Nice, et qui vient d'aboutir à la découverte de plus de 2 000 étoiles doubles en dix ans par P. Muller et l'auteur. Je trie ces étoiles en géantes et naines, et sélectionne celles qu'il faut observer chaque année, celles qui sont proches de nous et dont l'étude nous permettra de mieux connaître la structure de ces objets.

Enfin l'ouvrage se termine par un complément indispensable : un catalogue d'étoiles doubles. Il est destiné à tous, depuis ceux qui ne disposent que de simples paires de jumelles, jusqu'aux sociétés possédant des instruments importants. Il est conçu pour que, chaque nuit, l'observateur puisse trouver ce qui lui convient. On s'est limité aux étoiles assez lumineuses, faciles à trouver. J'ai surtout pensé à ceux qui n'ont pas de monture équatoriale, ce qui est mon cas l'été à la campagne.

Puisse le lecteur y trouver un intérêt nouveau pour l'observation des étoiles doubles, ou mieux, voir naître une vocation d'observateur dont l'astronomie a tant besoin.

Il revenait à Jean-Claude Pecker, Professeur au Collège de France, d'écrire la préface de ce livre, je l'en remercie. Grâce à lui, l'observatoire de Nice a pris un nouveau départ en 1963, et lorsqu'il nous quitta six ans plus tard, les deux grosses lunettes de 76 et 50cm, témoins de notre collaboration, permettaient à Nice d'être un des hauts lieux de l'observation visuelle.

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE

Les étoiles doubles dans l'Univers

L'Univers est constitué principalement d'étoiles et de nébuleuses. Les étoiles sont des astres chauds, formés en grande partie d'hydrogène; elles sont le résultat de la division et de la contraction de nébuleuses gazeuses sous l'effet des forces de gravitation et de rayonnement. Les pressions engendrées par ces contractions portent les gaz à de hautes températures. La phase stellaire commence avec le déclenchement, au coeur de l'astre, de réactions de fusions nucléaires, qui donnent à l'étoile son rayonnement propre.

Ces astres ont des dimensions très variables. Le Soleil, étoile moyenne, mesure plus d'un million de kilomètres de diamètre, le système Terre-Lune tiendrait largement à l'intérieur. Certaines sont des milliards de fois plus grosses, d'autres des milliards de fois plus petites. Par contre l'échelle des masses est plus étroite : d'un vingtième à quarante fois la masse du Soleil qui, lui-même, renferme trois cent mille fois plus de matière que la Terre.

Au sein du Soleil, très profondément, l'hydrogène se transforme en hélium, au taux de cinq cent soixante millions de tonnes par seconde. Cette faible quantité, par rapport à l'astre, pourrait passer inaperçue, les réserves d'hydrogène dureront des milliards d'années; mais l'énergie dégagée par cette transmutation ne passe pas, elle, inaperçue. La puissance fournie s'élève à cinq cent mille milliards de milliards de chevaux-vapeur. Cette énergie se transmet petit à petit aux régions superficielles, où elle entretient une température voisine de 5 700°; elle s'échappe dans l'espace à raison de dix chevaux-vapeur par centimètre carré de la surface du Soleil, qui vaut plus de dix mille fois celle de la Terre. Certaines étoiles rayonnent trois cent mille fois plus, comme S Doradûs, d'autres cent mille fois moins, comme Proxima Centauri.

Les étoiles se groupent en amas géants appelés galaxies. Ce sont des systèmes plats, souvent spiralés, appelés parfois pour cette raison nébuleuses spirales, que la lumière traverse d'un bout à l'autre en cent mille ans, à raison de trois cent mille kilomètres par seconde. On compte couramment cent milliards d'étoiles dans une galaxie.

Notre Soleil fait partie d'un de ces amas, appelé la Galaxie. Il occupe une position excentrique à vingt huit mille années de lumière du centre, pratiquement dans le plan du système. Le centre de la Galaxie se trouve dans la constellation du Sagittaire, bien visible dans nos régions les soirs d'été au sud. La Voie lactée n'est autre que la lumière de la multitude d'étoiles formant la Galaxie.

Les étoiles d'une galaxie ne sont pas immobiles, elles gravitent autour du centre de l'amas à une vitesse d'autant plus rapide qu'elles en sont plus proches. Ainsi le Soleil nous entraîne dans une ronde éternelle autour du centre galactique, mais les étoiles voisines participent aussi au mouvement qui est resté longtemps indiscernable, bien que la vitesse avoisine les deux cents kilomètres à la seconde.

La lumière met quatre ans pour parcourir l'intervalle moyen qui sépare deux étoiles dans notre voisinage. Elles sont donc très loin les unes des autres. Réduites à la dimension d'une balle de tennis, les étoiles seraient à trois mille cinq cent kilomètres les unes des autres. Leur mouvement mutuel est de l'ordre de leur diamètre en un jour. On voit donc que les collisions entre étoiles sont improbables.

L'observation montre que, très souvent, les étoiles sont associées par paires, une telle paire porte le nom d'étoile double. Les deux corps s'attirent fortement, mais cette force centripète est équilibrée par la force centrifuge de révolution. Il en résulte un mouvement orbital autour du centre de gravité, comme celui de la Lune autour de la Terre, et des planètes autour du Soleil. On conçoit que la forme et la rapidité de ce mouvement orbital nous renseignent sur les masses des corps célestes, d'où l'importance des étoiles doubles.

Notre Soleil est une étoile simple, le cortège de planètes qui l'auréole est invisible pour des astronomes comme nous observant depuis les étoiles proches. Par contre, notre voisine Alpha Centauri, en tout point semblable au Soleil, même âge, même dimension, est double. Une étoile satellite, deux ou trois fois plus petite, l'accompagne à une distance que la lumière met quatre à cinq heures à parcourir.

Ces systèmes ont probablement été formés en même temps que les étoiles qui les constituent, par la contraction d'une nébuleuse primitive et sa fragmentation tourbillonnaire. L'étude des étoiles doubles est donc importante pour la cosmogonie.

On constate une grande diversité dans ces systèmes. Il existe des paires d'étoiles si proches l'une de l'autre que leur surface est presque en contact. Les phénomènes de marée y sont tels que les astres composants sont allongés en ellipsoïdes, que leur matière superficielle s'échange ou même est expulsée petit à petit dans l'espace. De tels systèmes ont des durées de révolution très courtes, quelques heures. On en connaît un grand nombre : par exemple W Ursae Majoris est formée de deux astres à peu près identiques, qui tournent l'un autour de l'autre en huit heures. Leurs centres sont à moins de deux millions de kilomètres, les surfaces se touchent presque. On connaît ces systèmes par l'analyse de leur lumière au spectrographe, et par l'étude des éclipses mutuelles qui rendent leur éclat variable, comme l'étoile Algol. Leur distance mutuelle est trop petite pour qu'on puisse voir les deux corps séparément. Ces systèmes portent le nom d'étoiles doubles spectroscopiques ou photométriques, selon que leur étude peut se faire avec les spectrographes qui dissocient les longueurs d'onde de la lumière, ou avec les photomètres qui permettent de mesurer les éclipses mutuelles.

Lorsque les deux composantes d'une étoile double sont plus écartées, quelques centaines de fois leur rayon, on peut les distinguer dans les lunettes ou les télescopes. Dans ce cas, on les appelle étoiles doubles visuelles. L'observateur assiste en spectateur au parcours des orbites, ce qui demande des années et souvent des siècles. Il constate « de visu » que la loi de la gravitation énoncée par Newton est universelle. Il remarque en même temps que les lois de Képler, qui en dérivent, ordonnant les orbites des planètes, s'appliquent aussi aux systèmes stellaires, aussi loin que nous pouvons les voir. Cette heureuse circonstance d'observer un peu partout des étoiles doubles, nous montre l'universalité des lois de la physique et nous permet en retour de comparer entre elles les masses des étoiles.

Quelquefois les deux étoiles d'un système sont identiques, comme le couple γ Virginis, parfois les astres sont très dissemblables, comme dans le système de Sirius, ou de α Ursae Majoris. Il arrive même qu'on ne discerne pas le compagnon, il se révèle par le mouvement de l'étoile principale. De tels systèmes s'appellent étoiles astrométriques. L'étude des couples formés de corps dissemblables, appelés primaire et secondaire, donne des informations sur l'évolution des étoiles. Ces dernières épuisent à la longue leur réserve d'énergie nucléaire, en vieillissant leur structure se modifie, mais le vieillissement n'est pas le même pour des astres de masses différentes. Dans un système les composantes dissemblables n'évoluent donc pas à la même vitesse. L'étude des étoiles doubles permet ainsi à l'astronome et au physicien d'aborder bien des problèmes posés par ces corps mystérieux que sont les étoiles.

Les étoiles doubles, ou binaires, ont donc été classées en plusieurs catégories selon les méthodes d'observation. Parfois un système appartient à plusieurs catégories. C'est le cas de α Centauri, étoile double visuelle, mais aussi spectroscopique et astrométrique. Nous étudierons dans ce livre uniquement les étoiles doubles visuelles, les autres genres faisant appel à des techniques très différentes, peu accessibles aux amateurs. Ce sont la distance entre les composantes et l'inclinaison du plan de l'orbite par rapport à l'observateur qui imposent la catégorie. Les étoiles très rapprochées, presque au contact, ont des vitesses relatives très grandes qui donnent des raies spectrales bien décalées grâce à l'effet Doppler-Fizeau, et des probabilités d'éclipses. Au contraire, si les objets sont assez écartés pour être discernés, leur vitesse relative est plus faible et le couple ne peut être étudié au spectrographe.

On observe dans le ciel des systèmes de toutes les dimensions, jusqu'à des couples tellement écartés que l'attraction pourtant très faible des étoiles voisines peut dissocier le système. Naturellement toutes les étoiles doubles ne sont pas observables, tandis que beaucoup restent à découvrir. Enfin il existe des associations fortuites, dues à la perspective, on les appelle des couples optiques. Leur nombre est petit à côté de celui des étoiles doubles réelles.

Intérêt de l'observation des étoiles doubles

Ces astres sont tellement divers et répandus que n'importe quel instrument en montre, même une simple paire de jumelles de théâtre. Plus l'instrument augmente en puissance, plus on en remarque. A tel point que le nombre de couples connus augmente sans cesse, il dépasse soixante mille. En fouillant le ciel, et en inspectant les étoiles une à une avec des grossissements élevés associés à de grandes lunettes ou télescopes, on trouve encore maintenant des systèmes. Et chacun d'eux contribue à connaître le comportement des étoiles.

Au moment de l'invention des lunettes, au début du XVII^{ème} siècle, on ne connaissait ni la distance ni la dimension des étoiles. La notion d'étoile double n'est pas contemporaine de Galilée, le premier astronome muni d'une lunette. La première binaire découverte est Mizar, second cheval du Grand Chariot, dont le compagnon, presque aussi lumineux, à quatorze secondes de degré, a été observé par Riccioli en 1650, soit quarante et un ans après les premières observations de Galilée. Quelques années plus tard, en 1656, Huyghens remarque le trapèze d'Orion, système sextuple. Ces découvertes fortuites ne font pas penser aux étoiles doubles, pas plus que la découverte de la binaire à éclipses Algol, en 1.669, par Montanari. On attribue ces rapprochements à la perspective. La vraie nature d'Algol, système de deux étoiles dissemblables qui s'éclipsent toutes les quarante huit heures, sera établie deux siècles plus tard.

C'est, comme nous le verrons, William Herschel qui a pensé le premier aux étoiles doubles, en tant que systèmes physiques, et qui en a entamé une recherche plus d'un siècle après Galilée.

L'observation des étoiles doubles visuelles a toujours vivement intéressé nombre d'amateurs et de professionnels. Même un astronome de métier, après de nombreuses années d'observation, ne reste pas insensible au spectacle d'un de ces objets dans le champ de son instrument. L'intérêt ne réside pas seulement dans le spectacle, même s'il s'agit d'un couple difficile réservé aux grands instruments, mais dans le mouvement plus ou moins rapide des composantes autour du centre de gravité, ce qui permet au bout d'un certain temps d'avoir connaissance de l'orbite relative d'une étoile par rapport à l'autre.

Les étoiles doubles sont tellement diverses et nombreuses que même les plus petites lunettes ont un choix d'objets étendu. Dans un petit instrument les images sont toujours fines et stables, ce qui est rarement le cas dans un grand. L'observation des binaires permet de se rendre compte de la qualité d'un objectif; certains astres comme Antarès du Scorpion ou Epsilon du Bouvier sont des couples d'aspect délicat. Bien les voir dans une petite lunette de sept centimètres est déjà une performance. Avec un objectif un peu plus grand, de dix centimètres par exemple, le choix d'objets devient très étendu, des couples comme Zêta du Bouvier, dont les composantes de même éclat sont à 1",1 l'une de l'autre, sont des repères pour la qualité de l'instrument. Certains couples à grande différence d'éclat, comme Sirius et son compagnon dix mille fois moins lumineux, découverts avec de puissants instruments sont observables avec des lunettes d'ouverture modeste. Le compagnon de Sirius a été vu à Nice avec une lunette de dix centimètres, pourtant l'observation en est difficile même dans les très grands instruments.

Pour peu qu'on se prenne au jeu, on devient vite passionné des étoiles doubles et on accède à des astres de plus en plus difficiles et intéressants. Ce genre d'observation est très subjectif. Burnham en Amérique et Jonckheere en France ont découvert, avec de modestes moyens d'amateurs, des étoiles doubles très difficiles à voir même avec des instruments beaucoup plus gros. Ce qui a fait passer quelque temps, pour de purs imaginatifs ces observateurs hors du commun.

D'ailleurs le spectacle offert par les étoiles doubles lumineuses et diversement colorées a été décrit par des auteurs comme Arago et Flammarion au siècle dernier, avec le style fleuri adapté aux lecteurs des Astronomies populaires.

Ces astronomes, aidés par d'énergiques observateurs, ont popularisé les grandes lunettes et favorisé leur développement par le mécénat, rendant ainsi un service décisif à l'astronomie tout entière. C'est aux étoiles doubles que l'on doit la grande lunette de 91 cm financée par Lick en Californie, celle de 69 cm de Bloemfontein, financée par Lamont et dans une mesure moindre, celles de 101 cm de l'observatoire Yerkes et de 76 cm de Nice, créée par Bischoffsheim.

Nous ne ferons pas ici un historique complet sur les étoiles doubles, ce qui a déjà été fait par plusieurs auteurs tels que P. Baize (1930), R. G. Aitken (1935) et W. D. Heintz (1971). Nous insisterons sur les faits importants et sur l'histoire contemporaine dont sont tributaires nos connaissances actuelles sur les couples stellaires.

Dans ce domaine, l'importance du passé est grande, car les observations nécessaires à la

connaissance des orbites remontent souvent fort loin, plus d'un siècle. Il est essentiel de savoir quels astronomes avec quel matériel ont observé les couples dont nous calculons actuellement les trajectoires. Les observations anciennes sont précieuses, le recul du temps accroît leurs valeurs scientifiques.

Les précurseurs. Herschel père et fils

C'est Sir William Herschel (1738-1822) qui entreprit le premier le recensement des étoiles doubles à partir de 1776, dans le but de mesurer des parallaxes stellaires par comparaison de la position de l'étoile principale à celle de sa voisine plus faible, supposée beaucoup plus loin sur la même ligne de visée. Cette méthode ingénieuse, imaginée par Galilée, élimine les erreurs dues à la précession, à la nutation, à la réfraction, ainsi que de nombreuses erreurs instrumentales.

William Herschel observait avec des télescopes de sa fabrication, l'un de 50cm et l'autre de 1,30m, à miroir de bronze. Ces instruments, les plus puissants de son époque, lui permettent de mener à bien ses fameuses observations sur le dénombrement des étoiles, travaux que n'envisagent pas les observatoires nationaux préoccupés d'astronomie de position dans un but de navigation et de cartographie. Les miroirs exécutés avec le plus grand soin donnaient des images bien rondes; par contre les montures étaient azimutales et non munies d'entraînement. L'observateur suivait les étoiles à l'oeil, parfois sans oculaire, d'un bout à l'autre du champ, en les faisant défiler plusieurs fois par la force des bras agissant sur l'instrument. Il ne disposait que de micromètres grossiers, ne permettant pas de mesures précises. Enfin la théorie des images stellaires n'était pas encore faite, elle est due à sir G. B. Airy (1850). On pensait à l'époque que le diamètre apparent des images dépend du grossissement et de l'éclat. Comme la plupart des mesures d'étoiles doubles de W.Herschel sont faites par comparaison avec une estimation de la dimension du disque stellaire, elles n'ont qu'une faible valeur scientifique, mais le recul de deux siècles les rend néanmoins très précieuses.

W.Herschel se rendit compte que les mouvements observés dans les systèmes stellaires sont dus non pas à la parallaxe, mais à des mouvements orbitaux. Au début du XIXème siècle, il publie un mémoire où il décrit les premières orbites extérieures au système solaire, en particulier celles de Castor et Gamma Vierge. C'est ainsi que l'histoire des étoiles doubles commence comme un sous-produit de la recherche des parallaxes d'étoiles.

Sir John Herschel (1792-1871), fils de William, reprit l'étude des étoiles doubles à partir de 1816 avec Sir James South, dans l'hémisphère Nord puis dans l'hémisphère Sud au Cap de Bonne-Espérance. Leur récolte de plus de trois mille couples a une grande valeur historique, car elle montre l'importance de la population des étoiles doubles et elle stimule les recherches ultérieures.

Les premiers modernes. Struve père et fils

Si les Herschel ont été des initiateurs, leur vrai successeur W. Struve (1793-1864) est le pionnier de l'astronomie moderne des étoiles doubles. Cet astronome, à l'observatoire de Dorpat en Estonie, est le premier à disposer d'une lunette à monture équatoriale (1824), mue par une horloge et munie d'un micromètre à fils. Cette lunette de 24 cm d'ouverture, construite par J. von Fraunhofer, est aussi la plus puissante de l'époque. Les croquis de cet instrument montrent tous les organes essentiels des lunettes astronomiques modernes.

W.Struve découvrit 3 134 couples stellaires avec cet instrument. Il fallait compléter ces découvertes par la mesure précise de la position des objets dans le ciel, ce que n'avaient pas fait les Herschel qui, accaparés par de multiples travaux, ont laissé aux observatoires nationaux la lourde tâche de faire des catalogues de positions. Mais W. Struve, à la tête d'un grand établissement bien outillé, se devait de combler cette lacune. A cette époque, seules les étoiles les plus lumineuses ont fait l'objet de mesures précises avec des cercles méridiens. Chaque étoile double découverte était, en général, un objet nouveau sans identification préalable. Il importait en premier lieu d'en avoir une position précise dans le ciel.

C'est ainsi que W. Struve publie ses résultats dans trois ouvrages fondamentaux écrits en latin : le *Catalogus novus Stellarum duplicium* (1827) donnant la liste de ses étoiles doubles avec une position approchée et une description succincte,

les *Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae* (1837) où se trouve le détail des mesures des couples)

enfin les *Positiones mediae* (1852) qui donnent les positions précises observées au Cercle méridien.

La méthode de travail de W.Struve diffère de celle de ses prédécesseurs. Son instrument, muni d'un entraînement avec mouvement de rappel, le libère de la contrainte énorme de suivre les astres à la main, ce qui se faisait au détriment de l'acuité visuelle. Il ne faut pas chercher ailleurs la raison pour laquelle des astres comme le compagnon de Sirius n'ont pas été découverts par les Herschel vers 1815, ainsi que de nombreux couples évidents avec les ouvertures dont ils disposaient.

W.Struve observe jusqu'à 400 astres à l'heure. C'est rapide, puisqu'il ne lui faut que neuf secondes en moyenne pour amener son étoile dans le chercheur, la centrer et l'examiner avec un grossissement adéquat. Mais cet astronome a pour but l'examen de la plus grande aire céleste possible. En trois ans, ses découvertes représentent l'examen de cent vingt mille astres, soit une étoile double sur trente huit simples.

Après ces recherches, à partir de 1839, W.Struve fonde l'observatoire de Poulkovo, près de Saint-Petersbourg, et y installe une lunette de 38cm avec laquelle son fils Otto (1819-1905) continue l'oeuvre de son père en découvrant plus de cinq cents couples, dont les mesures sont publiées en 1843 et 1850, et en effectuant de nombreuses observations sur les étoiles du Catalogus Novus.

Cette lunette de 38cm détrône du premier rang celle de 24cm, elle ne sera dépassée que 27 ans plus tard par celle de 47cm de l'observatoire Dearborn, à Chicago. Mais ces instruments de Dorpat et Poulkovo ont servi de modèle aux lunettes géantes européennes et américaines de la fin du XIXème siècle.

Ces travaux des Struve ont une grande importance par leur recul de plus d'un siècle, puisque vingt-trois pour cent des orbites stellaires actuellement connues sont des systèmes découverts par eux.

Après ces premières recherches de Poulkovo, l'histoire des étoiles doubles suit celle des grandes lunettes astronomiques.

L'ère des grands pionniers

En 1873 débute l'ère des grands pionniers américains, avec les premières découvertes de S. W. Burnham (1838-1921). Cet astronome amateur acquiert vite une réputation internationale en découvrant ses premiers couples avec sa lunette privée de 13 cm, découvertes qu'il porte à 437 avec cet instrument. Il se voit confier la lunette de l'observatoire Dearborn, déjà mentionnée, et y trouve 409 couples, en collaboration avec G. W. Hough qui en découvre 622.

Ses dons d'observateur, son enthousiasme, s'ajoutent à ceux des Lowell et Schiaparelli qui croient découvrir la vie sur la planète Mars et décrivent l'oeuvre des ingénieurs martiens. Cet enthousiasme se communique aux mécènes qui, probablement blasés du spectacle offert par l'humanité, financent les grandes lunettes européennes et américaines. Burnham fait des séjours à Lick (248 couples à la grande lunette), à Yerkes (61 couples), à Washington (14 couples à la lunette de 66 cm), à Washburn près de Chicago (87 couples à la lunette de 39 cm), totalisant 1 336 étoiles doubles.

Burnham recherchait un peu au hasard ses couples, il avait l'habitude d'examiner les étoiles voisines de celles qu'il mesurait, ouvrant ainsi la recherche à des examens plus systématiques.

Au début du XXème siècle, Burnham réunit dans un grand catalogue toutes les étoiles doubles connues à l'époque. Ce remarquable travail A General Catalogue of double stars within 120° of the North Pole, publié en 1906, donne les mesures, l'identification, la bibliographie et une foule de notes sur chaque étoile, au nombre de 13 665. C'est un modèle du genre par la clarté de l'exposition, l'abondance de l'information et le souci de la vérité. L'auteur vérifiait lui-même à la lunette, sur le ciel, tout ce qui lui paraissait douteux ou incomplet.

Après 1901, Burnham ne recherche plus de couples nouveaux, mais il fait un énorme travail à la grande lunette de Yerkes ; de 1907 à 1912 il effectue 9 500 observations de couples à grande séparation en vue de préciser leur mouvement propre.

Burnham, par ses recherches, a montré que la prospection des binaires visuelles est loin d'être achevée. Avec la mise en service des colossales lunettes américaines, et l'amélioration des catalogues d'étoiles, des recherches systématiques peuvent commencer. Pour de tels travaux, il y a deux façons de procéder, soit en établissant des cartes célestes à l'aide de catalogues complets jusqu'à une certaine magnitude, soit en passant directement du catalogue au ciel. C'est ainsi que R.G. Aitken (1864-1951) et W. J. Hussey (1862-1926) dressent des cartes, jusqu'à la magnitude 9,0 et 9,1, à l'aide des catalogues de l'Astronomische Gesellschaft et passent le ciel en revue, étoile par étoile.

Les observations commencent en automne 1899, ils se partagent les deux lunettes de 30 cm et 91cm de l'observatoire Lick. Le petit instrument, plus facile à manoeuvrer que le grand, permet de voir un plus grand nombre d'étoiles à l'heure. Plus du tiers des couples découverts à Lick sont dus à cette lunette, mais ils sont mesurés presque tous au grand instrument. Malheureusement, ni Aitken, ni Hussey n'indiquent les zones célestes prospectées avec chacun de ces instruments, à part la calotte polaire au-delà de 60° de déclinaison, uniquement observée à la petite lunette. Il y a donc des aires célestes importantes, mais qu'on ignore, qui n'ont pas été étudiées avec un instrument d'ouverture supérieure à 30cm. Ceci explique en grande partie la moisson actuelle de couples nouveaux.

Au bout de cinq ans, deux mille couples sont découverts par ces deux observateurs. Mais Hussey est nommé Directeur de l'observatoire de Ann Arbor (Michigan) et Aitken continue seul. La prospection se termine vers 1915 avec un apport total de quatre mille binaires, en majorité difficiles, dont un pourcentage important sont à courtes périodes.

Hussey, pris par ses nouvelles fonctions, n'abandonne pas ses recherches sur les binaires. A la Plata, dont l'observatoire dépend de l'université du Michigan, il découvre trois cents couples dans l'hémisphère Sud, avec la lunette de 43 cm, de 1912 à 1914. Puis il se consacre à l'installation de la lunette de 69 cm de l'observatoire de Bloemfontein qui porte le nom de Lamont-Hussey, le mécène et le chercheur. Hussey s'apprêtait à reprendre ses découvertes avec cet instrument, quand il fut terrassé par une crise cardiaque quelques jours avant l'inauguration (octobre 1926).

L'Europe ne reste pas inactive. Le R.P.T.E.H. Espin (1858-1934) en Angleterre, dans son observatoire privé de Tow Law, avec des télescopes de 45 et 60 cm, R. Jonckheere (1889-1974), près de Lille (lunette de 33 cm), puis à Greenwich (lunette de 71 cm), découvrent aussi près de quatre mille étoiles doubles, par la méthode de l'examen direct. Mais ces couples découverts avec des moyens moins puissants sont statistiquement moins intéressants que ceux découverts en Californie ou à Chicago, car très peu présentent un mouvement orbital depuis leur découverte déjà ancienne. En 1917 Jonckheere publie un catalogue de toutes les découvertes et mesures faites depuis Burnham.

Pourtant vers 1925, le nombre d'observations est tel qu'un nouveau catalogue général s'impose. Commencé par E. Doolittle, il est terminé et publié par R.G.Aitken (1932) sous le titre *New General Catalogue of double stars within 120" of the North Pole*. Cet ouvrage en deux tomes contient 17 180 objets et donne pour chaque couple le complément des mesures parues depuis le catalogue de Burnham. Malgré son ancienneté, ce recueil sert toujours de référence aux observateurs, car il n'a pas été suivi d'autres catalogues généraux de mise à jour.

Les prospections modernes

A part celle de Espin et Milburn en Angleterre qui se poursuit jusqu'en 1930, les grandes prospections cessent dans l'hémisphère Nord à partir de 1918. On pense à cette époque que le recensement des binaires visuelles est presque achevé. Jonckheere n'hésite pas à écrire dans l'introduction à son catalogue de 1917: « The rapid increase of new double stars has this year come to a sharp conclusion, at least for stars as bright as D.B. 9,0. All these stars have now been examined at the Lick Observatory, and it is not probable that many of the stars whose duplicity could not be observed from Mount Hamilton will be detected elsewhere. »

(note : Le rapide accroissement du nombre d'étoiles doubles nouvelles conduit maintenant à une conclusion nette, au moins pour les étoiles aussi lumineuses que les B.D. 9,0. Toutes ces étoiles ont été désormais examinées à l'observatoire Lick, et il n'est pas probable que beaucoup d'entre elles dont la duplicité ne peut pas être observée au Mont Hamilton soient visibles ailleurs.)

Mais l'auteur ne dit pas que plus du tiers du ciel a été prospecté avec la petite lunette de 30 cm, laissant de nombreux couples à découvrir même avec des instruments moyens.

A partir de 1920, les progrès de la classification stellaire permettent de trier les binaires connues selon leur type spectral, selon leur magnitude absolue (géantes ou naines) et selon leur éloignement au soleil. Ceci engage G. B. Kuiper, en 1934, à faire une prospection selon des critères astrophysiques. Il examine les étoiles les plus proches du soleil à la grande lunette de Lick et ajoute cent dix-sept couples, dont quelques-uns, surtout des naines rouges, se révèlent remarquables par la rapidité de leur révolution, fournissant en quelques années la connaissance de nombreuses masses d'étoiles.

Ce travail de Kuiper montre bien que le ciel des étoiles doubles n'a pas livré aux observateurs tout ce qui est accessible, spécialement en ce qui concerne les naines, ce que remarquait déjà Burnham trente ans plus tôt. Alors R. Jonckheere reprend sa prospection à Marseille (télescope de 80 cm) dans ce but et, de 1941 à 1945, recense près de deux mille couples de faible éclat. Mais il n'a pas la chance de Kuiper qui se limitait aux étoiles proches, car une étoile de faible éclat n'est pas forcément une

naine. Les listes de Jonckheere contiennent surtout des géantes lointaines à très lents mouvements, d'autre part l'écartement angulaire de ces étoiles est relativement important, comme celui des binaires découvertes par Espin.

Pour trouver des binaires naines, il faut limiter ses examens aux étoiles reconnues telles. C'est ce que fait C. E. Worley en 1960, d'après des listes d'étoiles naines trouvées par des méthodes spectrophotométriques par A. N. Vyssotsky. Il trouve ainsi une trentaine de couples de naines rouges, dont une dizaine sont remarquables par la rapidité de leur mouvement orbital.

Ces recherches montrent que les prospections antérieures n'ont pas été exhaustives. L'état des images télescopiques dû aux conditions atmosphériques, tout comme la puissance de l'instrument, limitent le rendement d'une prospection. Certaines binaires d'aspect délicat, par exemple à forte différence d'éclat entre les composantes, passent inaperçues par conditions médiocres dont l'astronome est souvent contraint de se contenter. D'autre part, au cours d'une révolution orbitale un système peut paraître simple à plusieurs reprises et échapper à un examen même attentif. Il en résulte que des binaires très intéressantes et nombreuses sont toujours inconnues.

C'est la raison pour laquelle l'observatoire de Nice entreprend une prospection depuis dix ans. Un sondage préliminaire à la lunette de 38 cm sur des étoiles à grand mouvement propre de la zone de Paris a d'abord permis de découvrir 145 couples sur 5 250 étoiles examinées. Ces résultats encourageants ont incité l'auteur à refaire une prospection générale avec la lunette de 50cm installée en 1967, et celle de 74 cm restaurée en 1969. Cette prospection commencée à la déclinaison + 17° vers le Nord concerne les étoiles AGK3 de 17 à 32°, puis les étoiles du catalogue d'Argelander (BD) au-delà de 32°. 65 000 étoiles examinées en neuf ans ont porté le nombre des découvertes à 1 500 binaires. De son côté P. Muller, à la lunette de 50 cm, examine la calotte polaire, prospectée auparavant par Aitken avec la lunette de 30 cm de Lick. Au Nord de + 60°, l'examen de 24 000 étoiles amène la découverte de 550 binaires. C'est donc un total de plus de deux mille couples découverts à Nice de 1967 à 1976. L'examen montre en moyenne une étoile double sur cinquante simples. Cette proportion est remarquablement constante tant en ascension droite qu'en déclinaison. Actuellement (1976), la prospection est faite à 65 % entre le pôle Nord et la déclinaison 17".

Ces nouvelles étoiles doubles, recherchées par nuits de qualité excellente, sont en général des objets difficiles à voir, même dans les très grands instruments. Vers les petites séparations, le nombre de couples nouveaux découverts à Nice est plus grand que le nombre de couples précédemment connu.

A l'observatoire de Belgrade, une recherche de couples nouveaux est en cours avec la lunette de 65 cm. Une centaine de binaires ont été recensées depuis 1969.

Recherches dans l'hémisphère Sud

L'hémisphère Sud a été prospecté beaucoup plus tard. Après les premières découvertes de J. Herschel, au début du XIXème siècle au Cap, quelques observations sont faites à l'observatoire de Sydney, mais il faut attendre la fin du siècle pour la reprise des observations d'étoiles doubles avec des moyens modernes.

R. T. A. Innes (1861-1933), au Cap, avec une lunette de 45 cm découvre 450 binaires de 1896 à 1903, et publie un premier catalogue (1899) d'étoiles doubles au sud de l'Équateur. En 1903, il est nommé directeur de l'observatoire de Johannesburg, mais il lui faut attendre la mise en service de la grande lunette de 67 cm en 1925 pour totaliser 1 600 couples.

Cet instrument, suivi peu après (1928) par la lunette de 69 cm de l'observatoire Lamont-Hussey à Bloemfontein, marque le début d'une très importante moisson de binaires. W. H. van den Bos (1896-1974) et W. S. Finsen, par la méthode directe du catalogue, découvrent à Johannesburg 3 200 couples de 1925 à 1935, tandis que R. A. Rossiter et ses collaborateurs à Bloemfontein, par la méthode des cartes, en découvrent près de huit mille de 1928 à 1946, ce qui est un travail gigantesque.

Depuis 1946, on peut dire que, grâce à d'aussi énergiques observateurs, le ciel austral est mieux prospecté que le ciel boréal. A aires célestes égales, on connaît presque deux fois plus de couples serrés dans l'hémisphère Sud que dans le Nord.

Le premier catalogue de Innes n'a pas eu de supplément. Les couples au Sud de — 19° de déclinaison sont recensés depuis 1927 par Innes et ses successeurs dans le Southern Catalogue looseleaf mimeograph. C'est un fichier perpétuellement mis à jour, connu sous les initiales S.D.S. (Southern Double Stars).

Depuis 1950, la prospection est arrêtée dans l'hémisphère Sud.

Les étoiles doubles découvertes par la photographie

Un grand nombre d'étoiles doubles ont été trouvées non dans le ciel, mais sur les clichés photographiques destinés à établir la Carte du Ciel. Quinze mille couples ont été ainsi découverts sans sortir des bibliothèques. Mais nombre d'entre eux n'existent pas et sont dus à des taches ou des bulles sur les plaques. Les clichés de la Carte du Ciel ne sont pas faits pour étudier les étoiles doubles; l'écartement angulaire très faible des composantes empêche généralement leur impression distincte. Les couples découverts ainsi sont très écartés et ne présentent aucun mouvement relatif sensible.

Il n'en est pas de même sur les plaques prises au foyer d'instruments à grande distance focale avec des précautions spéciales, tel que cela se pratique à Sproul, près de Philadelphie, en vue de la mesure des parallaxes stellaires, et à Flagstaff, avec le télescope astrométrique de 150 cm. Le nombre de binaires ainsi étudiées, appelées binaires astrométriques, est petit. Quelques-unes, comme Ross 614, formées de naines rouges extrêmes sont d'un grand intérêt.

Les étoiles doubles à grand mouvement propre commun

Il y a déjà quelque temps que l'on a mis en évidence le grand nombre d'étoiles naines, dont quelques couples sont connus, principalement depuis les recherches de Kuiper. Mais l'observation visuelle ne permet pas d'en atteindre un grand nombre, car la faiblesse de leur éclat empêche de les voir loin, pas plus de vingt-cinq années-lumière. Par la photographie, il est aisé de détecter les naines extrêmes beaucoup plus loin, jusqu'à cinq cents années-lumière.

On ne peut donc atteindre un grand nombre de naines doubles que par la photographie, en se limitant aux couples les plus écartés reconnaissables au mouvement propre commun des composantes. C'est W. J. Luyten un de ceux qui ont le plus contribué à la recherche des étoiles doubles faibles, au télescope Schmidt du Mont Palomar. Un trentième du ciel est prospecté, donnant un total de deux mille couples de magnitude plus lumineuse que 21,5, de séparation supérieure à 2" et de mouvement propre commun supérieur à 0",2 par an. Sur ces deux mille naines, il y a cent vingt naines blanches ou étoiles dégénérées parmi les compagnons et quatorze dont la naine blanche est la composante principale. Luyten en conclut que ces binaires constituent peut-être le type le plus commun, mais la faiblesse de leur mouvement orbital interdit à jamais d'avoir la connaissance de leurs orbites.

Quelques grands observateurs d'étoiles doubles

Le travail de pionnier fait par les prospecteurs d'étoiles doubles serait inutile sans son complément qui est l'observation continue des couples recensés afin de déterminer leurs orbites. Il se trouve que certains prospecteurs ne suivent que leurs propres découvertes. Mais l'astronomie des étoiles doubles compte de grands observateurs qui se sont attachés à observer et mesurer avec soin ce que d'autres ont découvert. Il convient d'en citer quelques-uns parmi les plus actifs.

Il arrive souvent que des observateurs ne sont pas des professionnels, mais des amateurs passionnés, comme l'était Burnham, dont le souci de l'exactitude et la puissance de travail sont les caractères dominants. C'est ainsi, qu'au XIX^{ème} siècle, deux européens se distinguent. Ce sont, en Angleterre le R. P. W. R. Dawes (1835), surnommé « l'oeil d'aigle », et en Italie le baron Ercole Dembowski (1850). A eux deux, avec des petites lunettes ne dépassant pas quinze centimètres d'ouverture, ils ont mesuré toutes les étoiles doubles accessibles à leurs instruments avec une exactitude qui se révèle très précieuse un siècle plus tard.

En Amérique, G. van Biesbroeck (1880-1974), d'origine belge, observe les couples les plus difficiles, pendant trois quarts de siècle de 1901 à 1974. En 1915, il a à sa disposition la plus grande lunette du monde à Yerkes (101 cm), qu'il partage en 1939 avec le télescope de 2 m de Mc Donald dans le Texas, enfin depuis 1964, il utilise le nouveau télescope de Kitt Peak (2,1 m) dans le Nouveau-Mexique. De nombreuses orbites d'étoiles doubles sont dues aux observations de cet astronome, qui fit trente-cinq mille mesures de dix mille couples. Actuellement C. E. Worley à Washington et W. D. Heintz à Sproul continuent la tradition américaine.

La France a toujours joué un rôle de premier plan dans l'astronomie des étoiles doubles. Camille Flammarion (1842-1925) a publié en 1878 un Catalogue des étoiles doubles et multiples en mouvement relatif certain, ouvrage remarquable par sa présentation, le souci du détail et la somme de travail qu'il représente. Mais la France a toujours eu des observateurs. Perrotin, dans les années 1880 à la lunette de 38 cm de Nice, et Giacobini, après la Première Guerre mondiale à la lunette de 30 cm de Paris, apportent une large contribution. P. Baize, médecin de son métier, mais amateur passionné, observe sans interruption les étoiles doubles depuis 1924. Il a eu l'usage, de 1930 à 1972, des lunettes

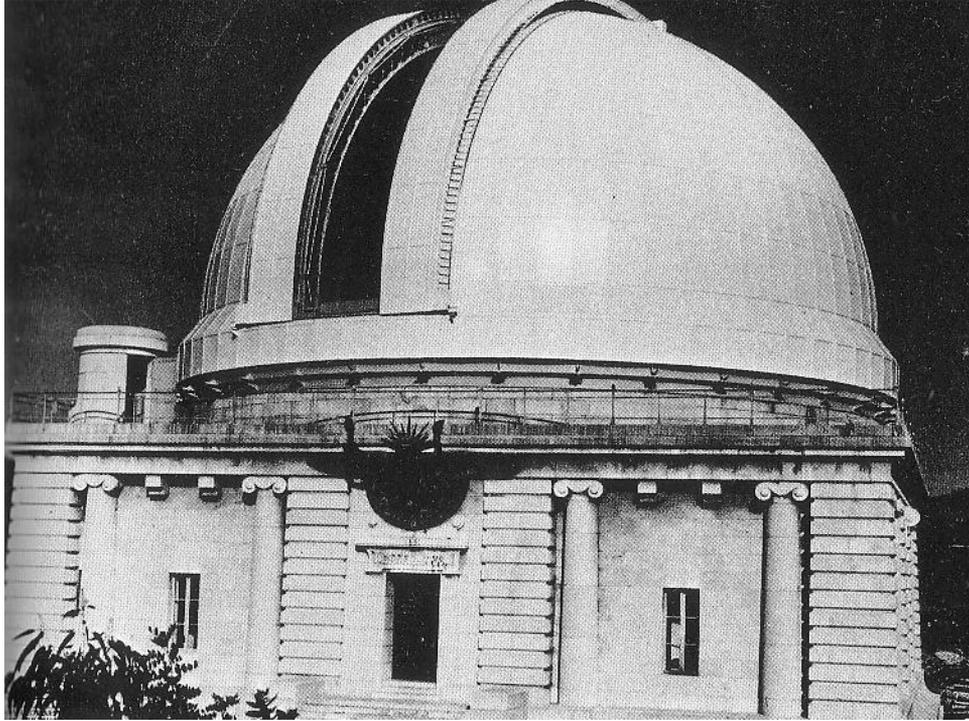
de 30 cm, puis de 38 cm de Paris, avec lesquelles il fit près de 25 000 mesures. Il est le seul Français à avoir mesuré des binaires pendant toute la durée de la Seconde Guerre mondiale. On lui doit en outre plus de cent trente orbites, et entre autre, un catalogue de naines rouges doubles. V. Duruy, ingénieur général des Mines, autre amateur passionné, a fait depuis 1937 des milliers d'observations dans ses installations privées de Nancy (lunette de 27 cm) et du Rouret dans les Alpes-Maritimes (télescopes de 40 et 60 cm).

Les Français se sont toujours montrés à la pointe du progrès pour l'amélioration des micromètres utilisés pour la mesure des étoiles doubles. A. Danjon (1937) invente le micromètre à lame demi-onde, P. Muller (1937) un micromètre à double image, V. Duruy (1935) un micromètre à étoile de comparaison.

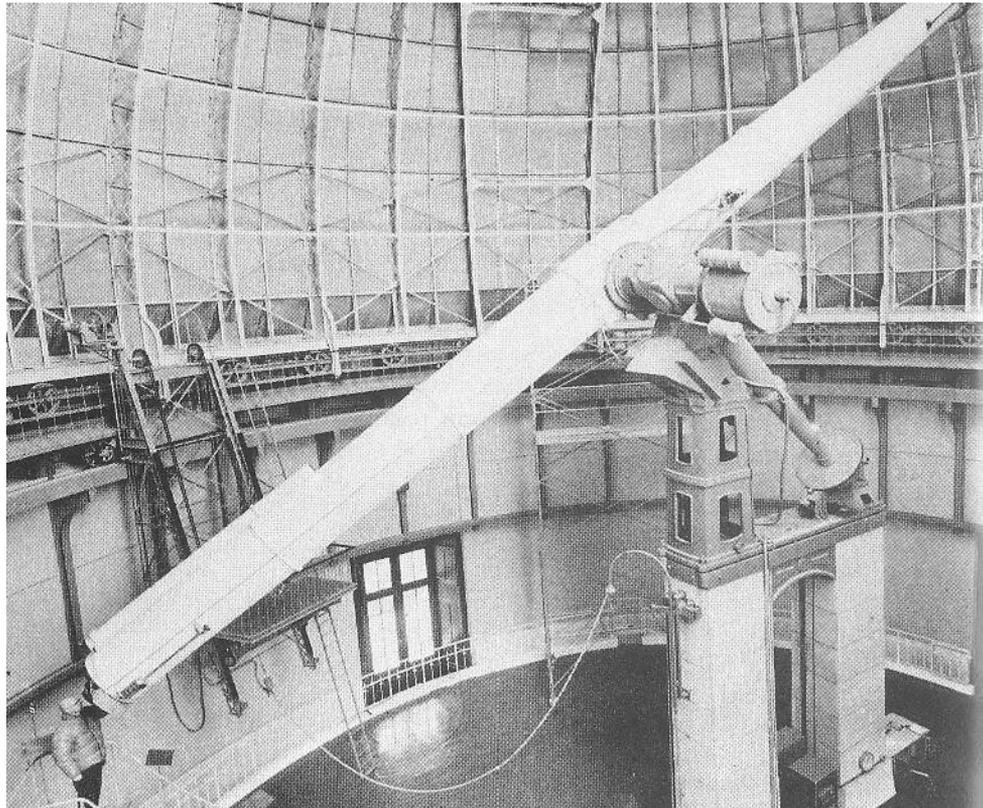
En Allemagne, il convient de citer Rabe, qui fit trente mille mesures de 1915 à 1956, avec la lunette de 27 cm de Munich, en Belgique S. Arend et J. Dommanget (lunette de 45 cm).

Dans l'hémisphère Sud, J. Voûte, d'origine hollandaise, observa des milliers de couples, de 1940 à 1944, à Java, à l'observatoire de Lembang, avec des lunettes de 37 et 60 cm.

Récemment de grands observateurs ont disparu, G. van Biesbroeck, W. H. van den Bos, R. Jonckheere en 1974 à quelques mois d'intervalle. Un vide se creuse dans les rangs déjà clairsemés des observateurs, qui actuellement se comptent sur les doigts d'une seule main. La retraite de plusieurs autres, comme P. Baize et W. S. Finsen, rend urgent le recrutement des observateurs. Mais sur trois milliards et demi d'individus que compte le globe, on peut espérer que l'astronomie des étoiles doubles trouvera des passionnés, comme elle en a toujours trouvés et que le flambeau si bien porté jusque-là n'est pas près de s'éteindre.



1 — Observatoire de Nice. Coupole Bischoffsheim, abritant la grande lunette. L'architecture est de Ch.Garnier, la coupole de G Eiffel. Cliché Observatoire de Nice



2 — Grande lunette de l'Observatoire de Nice. Objectif de 74 cm d'ouverture libre, retailé en 1966 par J. Texereau. Distance focale 17.89 m. Pouvoir séparateur $0",16$. Cliché Observatoire de Nice

La centralisation des mesures

L'ensemble des travaux dans l'hémisphère Sud n'a jamais été rassemblé dans un ouvrage analogue au catalogue de 1932. Ce dernier a d'ailleurs très vite vieilli par l'apport des mesures et des couples nouveaux. Une édition moderne des observations mondiales d'étoiles doubles s'avérant onéreuse et sujette aussi à un vieillissement rapide, il a semblé préférable de publier un Index.

On a donc rassemblé sous forme de cartes perforées tous les couples connus, ainsi que les mesures de chaque couple, chaque mesure faisant l'objet d'une carte. Cet énorme travail a été mené à son terme à l'observatoire de Lick en 1963 par H. M. Jeffers, W. H. van den Bos et F. M. Greeby. Tous les couples ainsi identifiés sur cartes ont été réunis en un ouvrage l'Index Catalogue of Visual Double Stars 1961,0.

Cet Index identifie, en deux tomes, 64 247 étoiles doubles. Pour chaque couple, il donne les positions pour 1900 et 2000, les dates de la première et de la dernière mesure, le nombre de mesures faites à des époques diverses (si ce nombre dépasse 25, le symbole 99 indique que les mesures sont nombreuses), les angles de position et distances correspondant aux époques de première et dernière mesure, les magnitudes des composantes réduites à l'échelle du Henry Draper Catalogue, les types spectraux, le mouvement propre de la primaire, le numéro du catalogue d'Argelander (DB) ou de Cordoba pour les étoiles australes, le numéro du catalogue d'Aitken et un renvoi éventuel à des notes explicatives. Ce catalogue sera mis à jour tous les dix ans environ. Il sert maintenant de référence pour l'identification de tous les couples publiés, sans omission, même ceux dont l'existence est plus que douteuse.

Les mesures sur cartes, au nombre d'environ 300 000, sont actuellement centralisées à Washington, c'est le fichier central. Des copies en existent à Hertsmonceux et à Nice, elles sont mises à jour plusieurs fois par an par le fichier central dont la responsabilité est assumée par C. E. Worley. Le contenu de ces cartes et de celles de l'Index est mis sur bandes magnétiques. Un des centres peut envoyer à tout demandeur les mesures désirées, rendant inutile la parution périodique de grands recueils de mesures.

Physionomie de l'ensemble des couples connus

Les soixante-dix mille couples connus représentent ce que nos moyens d'observation ont récolté, mais ne traduisent pas forcément la population exacte des binaires parmi les étoiles. Le tableau ci-contre donne les pourcentages dans trois intervalles de luminosité.

| | | | |
|--------------------|----|--------|------|
| magnitude | <8 | 8 à 11 | > 11 |
| n. de couples en % | 8 | 65 | 27 |

On constate que les trois quarts des étoiles doubles connues sont d'éclat supérieur à la magnitude 11, elles sont donc relativement lumineuses. Cela donne environ une double sur quinze étoiles. Le rapport réel est plus important, car dans le voisinage du Soleil il est proche de la moitié. Cela montre que la plupart des couples nous échappent dès qu'on s'éloigne.

Il y a un effet de sélection observationnelle bien mis en évidence, si on remarque que le tiers des couples connus sont formés d'étoiles à peu près égales, ce qui n'est pas conforme à la réalité, car les couples dissemblables abondent près du Soleil, tels Sirius, Procyon, η Cassiopeiae, ζ Herculis, 85 Pegasi, parmi les plus connus. Situés dix fois plus loin, ces systèmes, à part peut-être η Cassiopeiae, seraient inconnus, on ne verrait que des étoiles simples.

Les 27 pour 100 de couples faibles d'éclat sont obtenus soit par les étoiles trouvées dans les cartes du ciel, soit par les recherches photographiques du Mont Palomar sur les naines extrêmes, totalement invisibles, car beaucoup sont à la limite de détection photographique cent fois plus sensible que l'oeil.

A peine la moitié des couples recensés ont un mouvement propre et un type spectral connus. Le tableau ci-contre donne la répartition des types.

| | | | | | | | | |
|--------------------|------------|---|----|----|----|----|---|-------------|
| type spectral | O | B | A | F | G | K | M | particulier |
| n. de couples en % | Très rares | 8 | 25 | 26 | 22 | 16 | 3 | rares |

Ce sont les types moyens les plus représentés, cela correspond à la répartition spectrale des étoiles en général. Elle montre que les étoiles doubles ne se différencient pas des simples. Il faut noter que les recherches photographiques accroissent le nombre de naines rouges M.

Il est instructif de considérer la répartition des binaires en fonction de leur séparation angulaire. Le tableau cumulatif suivant donne le nombre de couples connus dans le ciel boréal et le ciel austral pour différentes limites d'écartements.

| séparation | n. de couples connus ciel boréal | n. de couples connus ciel austral |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| $\leq 0",25$ | 569 | 884 |
| $< 0",5$ | 1 929 | 3 266 |
| $< 1",0$ | 3 457 | 6 090 |
| $< 2",0$ | 6 192 | 10 143 |
| $< 5",0$ | 14 856 | 18 338 |
| Tous | 39 883 | 29 976 |

Ce tableau a été exécuté en 1975, à l'aide des bandes magnétiques du fichier central de Washington. Sur les 569 couples très serrés de l'hémisphère Nord, près de la moitié ont été trouvés par Paul Muller et par l'auteur depuis dix ans. Malgré cela, le Nord est en retard sur le Sud pour la récolte des couples serrés dont la moitié ont été découverts par Rossiter sous le beau ciel d'Afrique du Sud à Bloemfontein.

Au-delà de cinq secondes de séparation, les étoiles d'un couple sont considérées comme très écartées, car aux distances moyennes de trois à quatre cents années de lumière où se trouvent les étoiles doubles, cela correspond à plus de cinq cents fois la distance Terre-Soleil. Dans ces conditions, le mouvement orbital est trop lent pour être décelable, une révolution demande des milliers d'années. Le tableau montre que plus de la moitié des couples connus sont dans cette catégorie, qui, elle-même, est plus abondante dans le Nord, à cause des recherches de Luyten au Mont Palomar.

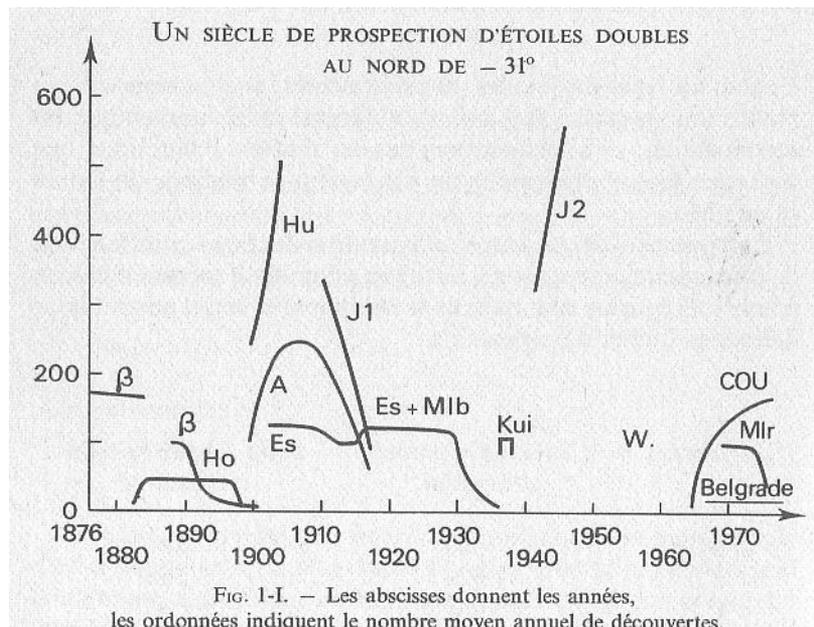


FIG. 1-I. — Les abscisses donnent les années, les ordonnées indiquent le nombre moyen annuel de découvertes.

A = R. G. Aitken. Lunettes de 30 et 91 cm de Lick. 3 100 couples.

β = S. W. Burnham. 1 336 couples découverts avec des instruments très divers, auxquels il faut ajouter 150 couples à grands mouvements propres communs découverts à part.

Belgrade. Une centaine de couples depuis 1966 découverts à la lunette de 66 cm par P. M. Djurkovic, D. M. Olevic, et G. M. Popovic.

Cou = P. Couteau. Nice, lunettes de 38 cm (145 couples), de 50 (1 400 couples), de 74 (une vingtaine de couples).

Es = T. E. Espin. Télescopes de 40 et 60 cm à Tow-Law, Angleterre, 2 700 couples.

Ho = G. W. Hough. 622 couples découverts à la lunette de 47 cm de l'observatoire Dearborn.

Hu = W. J. Hussey. Lunettes de 30 et 91 cm de Lick. 1 340 couples.

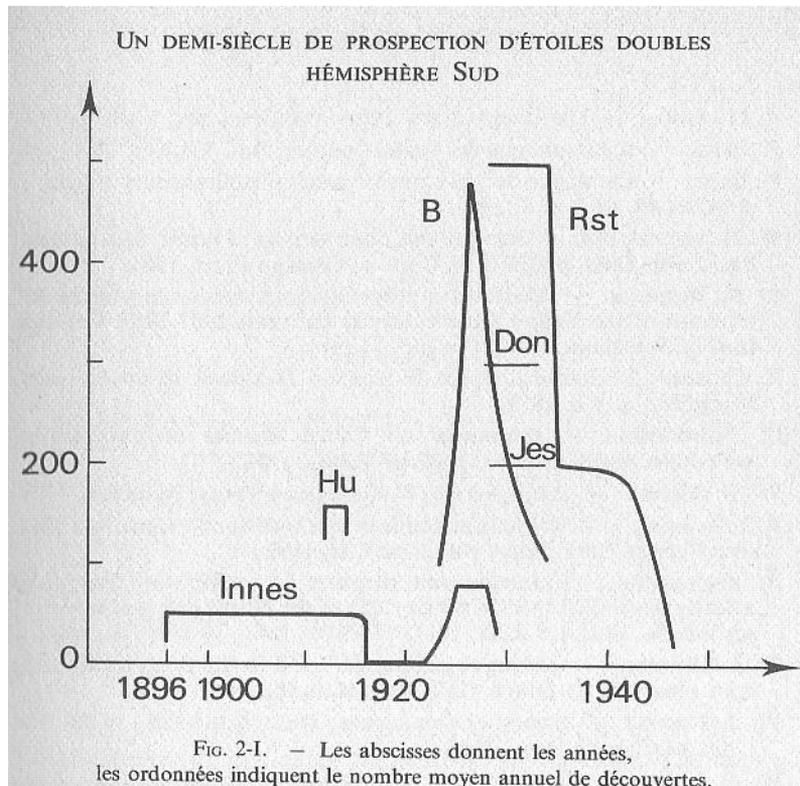
J1 = R. Jonckheere. 1 358 couples dont 1 010 à Lille (lunette de 33 cm) et 252 à Greenwich (lunette de 71 cm).

J2 = R. Jonckheere. 1 942 couples dont 495 à la lunette de 26 cm de Marseille, 1 362 au télescope de 80 cm de Marseille et 88 à Nice à la 38 cm.

Kui = G. B. Kuiper. Lunette de 91 cm de Lick. 117 couples.

Mlr = P. Muller. Les 4 premiers découverts à la 91 cm de Lick, les autres (561) à la 50 cm de Nice.

W = C. E. Worley. 30 couples de naines rouges à la 91 cm de Lick.



B = W. H. van den Bos. 2 800 couples à Johannesburg. Lunette de 69 cm.
 Hu = W. J. Hussey. 300 couples à la lunette de 43 cm de La Plata.
 Innes = 450 couples de 1896 à 1903 à la lunette de 45 cm du Cap, puis 1200 couples à la grande lunette de Johannesburg. Rst, Don, Jes, R. A. Rossiter, H. F. Donner, M. K. Jessup. 7368 couples dont 5 534 trouvés par Rst

BIBLIOGRAPHIE RESTREINTE

- G. AITKEN. — The Binary Stars. Dover Publ. Inc, New York, 1935. P. BAIZE. — L'Astronomie des étoiles doubles. Bull. S.A.F. p. 269, 1930.
 P. BAIZE. — Catalogue de 240 couples visuels d'étoiles naines rouges. J. des Obs. 49, n° 1, p. 1, 1966.
 W. H. VAN DEN BOS. — Surveys and observations of visual double stars. Basic Astr. Data, p. 320, The Univ. of Chicago Press, 1963.
 W. BURNHAM. — Measures of proper motions stars made with the 40" refractor of the Yerkes Observatory in the years 1907-1912. Carnegie Inst. of Washington, 1913.
 E. CROSSLEY, J. GLEDHILL, J. M. WILSON. — Handbook of double stars. Macmillan & Co, 1879.
 C. FLAMMARION. — Catalogue des étoiles doubles et multiples en mouvement relatif certain, Gauthier-Villars, 1878.
 W. D. HEINTZ. - Doppelsterne, W. Goldmann Verlag, Munchen, 1971. R. T. A. INNES. — Reference Catalogue of southern double stars. Ann. Roy. obs. Cape of Good Hope, vol. 2, part. II, 1899.
 R. JONCKHEERE. — Catalogue and measures of double stars discovered visually from 1905 to 1916 within 105° of the North pole and under 5" separation. M.R.A.S. LXI, 1917.
 R. JONCKHEERE. — Catalogue général de 3 350 étoiles doubles de faible éclat observées de 1906 à 1962. Obs. Marseille, 1962.
 W. J. LUYTEN. — Proper motion survey. Basic Astr. Data. p. 46. The Univ. of Chicago Press, 1963.
 W. J. LUYTEN. — Double Stars with common proper motion. Univ. Minnesota, n° 29, 10, 1972.
 THE WEBB SOCIETY OBSERVERS Handbook. — Vol I. Double Stars. The Mizar Press London, 1975.
 A. N. VYSSOTSKY. — ApJ 97, 381, 1943, ApJ 104, 191, 1946, ApJ 116, 21, 1952, AJ 61, 37, 1956, AJ 63, 77, 1958.

NOTIONS D'OPTIQUE A L'USAGE DES OBSERVATEURS D'ÉTOILES DOUBLES

L'instrument le plus utilisé. La lunette

La mesure des étoiles doubles est typiquement une observation à haute résolution. Elle exige des instruments donnant des images théoriques de diffraction, pouvant être examinées avec des grossissements suffisants.

Il y a un siècle et demi que l'on sait construire des objectifs de lunette donnant une bonne image sur l'axe optique. Les grandes lunettes de la fin du siècle dernier soutiennent bien la comparaison pour la haute résolution avec les meilleurs télescopes modernes.

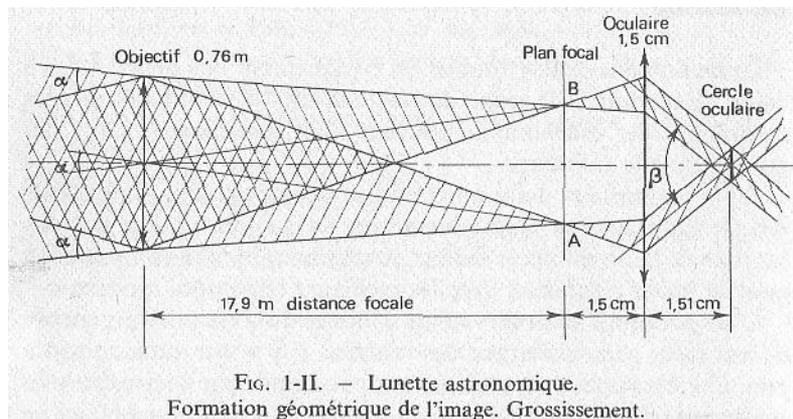
C'est pourquoi les observateurs d'étoiles doubles utilisent encore de nos jours principalement des lunettes. Il y a une autre raison à cela. Les télescopes sont utilisés à temps complet par de nombreuses équipes se relayant après de brèves missions. Cette façon de faire ne permet pas un travail très fructueux à l'observateur d'étoiles doubles, qui doit disposer de l'instrument au moment précis et imprévisible où les images sont bonnes et qui, au contraire, ne peut pas faire d'observations si les images sont de mauvaise qualité, même sous un ciel très pur. D'autre part, les lunettes, moins lumineuses que les télescopes, plus sélectives, moins adaptées à la réception d'appareils auxiliaires ne sont plus utilisées pour les travaux de spectroscopie et de photométrie électronique; elles sont réservées aux travaux d'astrométrie dont la mesure des étoiles doubles est une partie importante.

Beaucoup de notions qui suivent sont exposées en détail dans l'ouvrage Lunettes et télescopes de A. Danjon et A. Couder (1935). Nous insisterons sur ce qui est fondamental aux observateurs d'étoiles doubles.

Grossissements. Cercle oculaire

L'objectif donne une image sur une portion de surface appelée plan focal. La finesse de cette image dépend du diamètre de l'objectif. On examine l'image avec une loupe composée de plusieurs verres, appelée oculaire, qu'on peut schématiser, comme l'objectif, par une lentille mince (fig. 1-II). L'ensemble de l'optique est afocal, c'est-à-dire que le faisceau sort de l'oculaire en lumière parallèle. Un objet vu de l'objectif sous l'angle α donne une image à l'infini vue sous l'angle β de l'oculaire. Le grossissement est le rapport β/α , ou encore le rapport des distances focales F et f de l'objectif et de l'oculaire :

$$G = F/f \quad (1, II)$$



L'objectif forme l'image AB des composantes d'une étoile double dans le plan focal. L'oculaire permet de voir AB sous un angle β plus grand que l'angle apparent α . Pour plus de compréhension, le schéma n'est pas à l'échelle. On donne les dimensions réelles pour la grande lunette de Nice. Dans le cas de l'étoile double Castor

$$\begin{array}{ll} \alpha = 2.20'' & AB = 0,192 \text{ mm} \\ \beta = 44' & \text{Gross. } \beta/\alpha = 1200. \text{ diam. cercle oculaire } 0,63 \text{ mm.} \end{array}$$

Les myopes et les hypermétropes, qui n'accommodent pas à l'infini, ne peuvent observer avec un instrument rigoureusement afocal, mais la différence est toujours petite. Disons seulement que les myopes sont avantagés; dans un instrument mis au point pour eux, ils voient avec un grossissement plus important. D'ailleurs le myope ou l'hypermétrope peut avoir une vue normale à travers un instrument, car le faisceau de sortie, très fin, est d'un diamètre beaucoup plus petit que celui de la pupille de l'oeil, ce dernier travaille avec un grand rapport d'ouverture, ce qui atténue les effets dus aux défauts géométriques du cristallin. C'est la raison pour laquelle un groupe de visiteurs n'a généralement pas à modifier la mise au point d'une lunette ou d'un télescope en regardant les étoiles, même sans les verres correcteurs habituels.

L'image de l'objectif donnée par l'oculaire s'appelle cercle oculaire. Elle se trouve pratiquement dans le plan focal image de l'oculaire. La lumière qui traverse l'objectif, traverse aussi son conjugué, le cercle oculaire. C'est à cet endroit qu'il faut placer l'oeil pour recevoir tout le faisceau reçu par l'objectif et capté par l'oculaire. Immanquablement, le débutant met son oeil trop en arrière, diaphragmant ainsi le faisceau utile avec son iris et perdant une partie du champ.

Le rapport des diamètres de l'objectif et du cercle oculaire est égal au grossissement :

$$G = D/d = F/f \quad (1 \text{ bis, II})$$

La luminosité du cercle oculaire est G^2 .

D'après l'équation (1 bis, II) il y a un grossissement minimum en dessous duquel le cercle oculaire est plus grand que la pupille de l'oeil à son ouverture maximum, c'est le grossissement équipupillaire. Puisque la pupille atteint 0,6 cm de diamètre (jusqu'à 0,8 cm chez certains individus), ce grossissement vaut :

$$G_e = D/0,6$$

c'est le grossissement qu'aurait l'oeil d'un géant muni d'une pupille d'ouverture D .

Si on fait intervenir le rapport d'ouverture $m = F/D$, on constate que la distance focale f de l'oculaire correspondant au grossissement équipupillaire est:

$$f = 0,6 \text{ m}$$

ce qui donne une dizaine de centimètres avec les instruments utilisés pour l'observation visuelle.

Si on observe le plan focal sans oculaire, on devra se placer à une distance $\Delta = 0,6 \text{ m}$ pour avoir le faisceau entier dans la pupille. Comme Δ ne peut être inférieure à la distance minimum de vision distincte, qui est de 25 cm pour une vue normale, cela exige un rapport d'ouverture supérieur à 40. Aucun instrument actuel ne permet donc l'observation sans oculaire, mais il n'en était pas de même avec les longues lunettes du XVII^e siècle dont le rapport d'ouverture atteignait 290. Cette longueur démesurée des lunettes du temps de Molière avait pour but de réduire à des valeurs acceptables le défaut de chromatisme dû aux verres simples dont elles étaient munies.

Image donnée par un objectif circulaire. Pouvoir séparateur. Grossissement résolvant. Grossissement utile.

Dans le cas d'une source de lumière ponctuelle, l'éclairement à une distance n du centre de l'image géométrique, donnée par un objectif circulaire, est :

$$I = A^2 \left[\frac{2J_1(n)}{n} \right]^2 = A^2 \cdot \varphi^2(n) \quad (2, \text{II})$$

où A est une constante dépendant de l'éclat de l'étoile et de l'instrument, $J_1(n)$ est la fonction de Bessel du premier ordre. On passe de la distance n aux valeurs d exprimées en microns par :

$$d = 0,321 \cdot \lambda \cdot m \cdot n \quad (3, \text{II})$$

λ étant la longueur d'onde. L'ensemble de cet éclairement s'appelle image de diffraction ou figure d'Airy. Elle est constituée d'une plage centrale, le disque de diffraction, entourée d'une succession d'anneaux alternativement noirs et brillants. Le rayon linéaire du premier anneau noir s'écrit :

$$r = 1,22 \cdot \lambda \cdot F/D = 1,22 \cdot \lambda \cdot m \quad (4, \text{II})$$

tandis que le rayon angulaire s'exprime en radians par :

$$a = r/F = 1,22 \cdot \lambda/D \quad (4 \text{ bis, II})$$

Les longueurs d'onde visuelles efficaces étant centrées sur 0,55 micron, on a :
 $r = 0,67 \cdot m$ en microns et $a = 14/D$ en secondes d'arc D est exprimée en centimètres.

Quelques remarques s'imposent. Les quantités r et a concernent le même paramètre, à savoir la dimension du premier anneau noir de la figure de diffraction, mais r est une quantité linéaire et a est une quantité angulaire. La première est indépendante de l'ouverture, mais non de son rapport, c'est le contraire pour la seconde.

Le rayon linéaire est voisin de dix microns dans les lunettes astronomiques corrigées pour le jaune. Au foyer primaire des grands télescopes, dont le rapport d'ouverture est voisin de trois, ce rayon varie de 2,5 microns pour le rouge à 1,5 microns pour le bleu. Les lunettes donnent des images plus pures que les télescopes, le bleu et le rouge formant une large auréole violette, peu gênante visuellement, connue sous le nom de spectre secondaire. Le montage en Cassegrain augmente le rapport d'ouverture des miroirs de télescopes ainsi que la dimension de la tache de diffraction, mais il n'élimine pas la dispersion et, ce faisant, on n'a pas une valeur stable de la distance focale.

Ces considérations sont importantes pour l'observation des étoiles doubles. Dans une bonne lunette on voit par beau temps de fines images, pures, pratiquement théoriques, avec une sombre auréole violette autour des sources très brillantes. Mais les anneaux sont toujours bien tranchés et ne paraissent pas irisés.

Insistons maintenant quelque peu sur la différence fondamentale entre la photographie et l'oeil. La photographie enregistre des dimensions linéaires, l'oeil voit des angles. Si on photographie des étoiles doubles, on a intérêt à choisir, non seulement un grand rapport d'ouverture pour avoir une figure de diffraction aussi grande que possible, mais aussi une grande ouverture, pour que cette figure corresponde à de petits angles. L'observation visuelle exige seulement une grande ouverture, associée à des oculaires assez puissants. Or il se trouve qu'on voit bien une image de diffraction, mais que la photographie en est malaisée à cause de sa petitesse. C'est un grand avantage de l'observation visuelle sur l'observation photographique.

C'est ainsi que, malgré tous les progrès de la technique, on a du mal à obtenir de bonnes photographies des composantes de ζ du Cancer, ou de ω du Lion qui sont pourtant faciles à voir. Pire, il a fallu attendre 1971 pour découvrir le compagnon de θ de la Couronne Boréale, ce compagnon de septième magnitude s'en trouve à une demi-seconde. Il suffit de regarder cette étoile avec une bonne lunette de trente centimètres d'ouverture pour voir ce compagnon que la photographie avec de grands télescopes n'a pu découvrir jusque-là. Malheureusement, à notre époque le ciel n'est plus regardé, mais photographié, le résultat est qu'on perd les précieuses informations que la photographie ne peut nous donner. N'est-il pas curieux de pouvoir détecter des étoiles de vingt-troisième magnitude, perdues au fond de la Galaxie, et n'être pas capable de photographier une étoile de septième magnitude, parce qu'elle est à une demi-seconde d'une autre de quatrième magnitude?

Le pouvoir séparateur ou de résolution vaut par définition les 85/100 de la dimension angulaire du premier anneau noir. On a donc en secondes de degré :

$$p = 0,85 \cdot a = 12/D \quad (5, II)$$

Ainsi un objectif de dix centimètres d'ouverture a un pouvoir de résolution de 1,2 seconde (1,2"), ce qui correspond à deux taches de diffraction non séparées, mais discernables sous la forme d'un huit écrasé. Le pouvoir de résolution est une notion arbitraire qui ne correspond à aucune limite instrumentale.

Le grossissement résolvant est celui qui permet de voir la dimension du premier anneau à la limite de l'acuité visuelle, supposée égale à une minute de degré. On a donc :

$$p \cdot G_r = 60'' \quad G_r = R \text{ mm} \quad (6, II)$$

Ce qui signifie que le grossissement résolvant est numériquement égal au rayon de l'ouverture exprimé en millimètres, il est aussi égal à trois fois le grossissement équipupillaire.

Le grossissement résolvant permet de discerner l'image de diffraction à la limite de l'acuité visuelle. Si on veut la voir en détail, par exemple au cours de l'observation d'un couple d'étoiles serrées, il convient d'utiliser un grossissement plus important, appelé grossissement utile qui peut aller jusqu'à cinq fois le grossissement résolvant et qui est en général de trois à quatre fois. Au-delà, les contours de l'image sont mal définis et l'oeil ne peut transmettre l'information. Les mesures d'étoiles doubles ne doivent pas se faire avec des grossissements inférieurs à deux fois le grossissement résolvant.

Ces rappels de notions fondamentales vont nous permettre maintenant d'étudier la structure de l'image d'une étoile double serrée.

Structure de l'image d'une étoile double serrée

On appelle étoile double serrée, un couple dont les composantes sont séparées par un intervalle inférieur ou au plus égal au rayon du premier anneau noir de diffraction.

Les composantes d'un couple sont complètement séparées lorsque leur distance est supérieure au diamètre du premier anneau noir. L'impression visuelle est différente, parce que l'intervalle entre les étoiles paraît noir même s'il est plus petit que ce diamètre. Où s'arrête cette impression? Peut-on la relier mathématiquement à la théorie de la diffraction?

Nous insisterons sur ce point, car les avis ne sont pas toujours convergents sur la limite de séparation des instruments. A. Danjon et A. Couder ont défini la limite de résolution dans leur ouvrage cité plus haut, avec courbes à l'appui, et la donnent comme les 85/100 du rayon du faux disque. Mais les observateurs visuels mesurent des étoiles doubles encore plus serrées avec une relative facilité; la limite de résolution peut donc être franchie, où s'arrêter? Telle est la question parfois posée à laquelle les réponses sont variables. Nous allons analyser ce phénomène de « duplicité évanouissante » et le relier aux impressions visuelles.

Considérons le plan focal dans lequel nous supposons deux axes rectangulaires x , y (fig. 3-II). La composante A est à l'origine, la composante B sur l'axe Ax , à une distance x_0 de A.

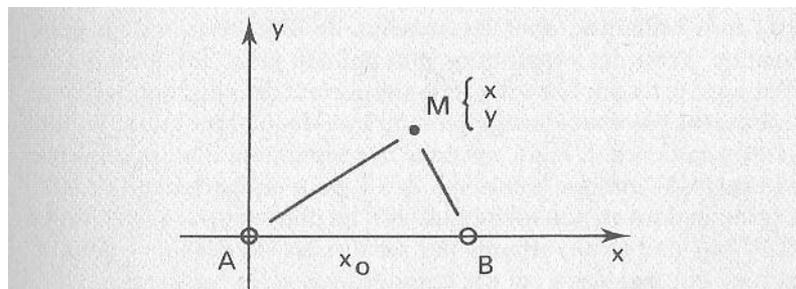


FIG. 3-II. — Éclairement en un point du plan focal.
Les deux composantes A et B contribuent chacune à l'éclairement en un point M.

Reprenons l'équation (2,II) qui décrit la structure de diffraction d'une source ponctuelle. Dans le cas d'une étoile double à composantes non séparées, les intensités s'ajoutent et l'éclairement en un point $M(x, y)$ du plan focal est :

$$I(x, y) = A^2 \cdot \varphi^2(\sqrt{x^2 + y^2}) + B^2 \cdot \varphi^2(\sqrt{(x - x_0)^2 + y^2}) \quad (7, II)$$

Quant aux équations des isophotes, elles s'écrivent :

$$\text{Cte} = I(x, y) \quad (8, II)$$

L'étude en détail des courbes de lumière de l'équation des isophotes permet d'interpréter les impressions visuelles que donne une étoile double dont les composantes sont plus rapprochées que le pouvoir séparateur.

Il convient de noter d'abord que l'intensité lumineuse à l'intérieur de la tache de diffraction, appelée aussi disque d'Airy, passe par un maximum très accusé au centre (fig. 2-II en hors texte), un pic de lumière, le photocentre. Une binaire très serrée montre un photocentre double ou allongé qui contribue, autant que l'aspect global du disque, à distinguer la duplicité.

Nous avons rassemblé dans le tableau I les résultats des calculs et d'interprétation sur un couple serré théorique, de composantes égales. Ils sont établis d'après les isophotes obtenus par le Centre de Dépouillement des Clichés Astronomiques (C.D.C.A.) à l'observatoire de Nice.

Il est bon de commenter ce tableau, riche d'enseignements. Pour une séparation d'un rayon, l'intensité relative du centre de la double image est de 0,75. Cela suffit pour donner l'illusion d'une séparation optique complète, c'est-à-dire avec un mince intervalle obscur entre les composantes. L'effet est particulièrement net avec les binaires pas trop brillantes, dont les anneaux de diffraction sont à peine visibles. Pour des séparations plus faibles, jusqu'à 0,8 rayon, on distingue deux photocentres. Il est important de remarquer qu'ils ne coïncident pas avec l'image géométrique des composantes, ils sont plus rapprochés. L'écart, nul pour une séparation d'un rayon, croît vite comme l'indique le tableau. Ainsi, pour un écartement de 0,85, correspondant au pouvoir séparateur, les photocentres se trouvent à 0,64 l'un de l'autre, séparés par un « creux d'intensité » de 0,96, encore discernables avec des composantes assez lumineuses.

Il en résulte que les micromètres à fils, dont le principe est basé sur la bissection des maxima de lumière par des fils fins, ne peuvent pas donner de mesures exactes pour les étoiles doubles non séparées; il en est de même pour les micromètres à double image. L'expérience montre que le meilleur micromètre est, dans ce cas, l'image de diffraction elle-même. Un observateur, très habitué à son objectif, ayant à son actif des années de pratique et des milliers de mesures, ne peut se tromper grossièrement en estimant la séparation d'après l'aspect de l'image. Mais il doit soumettre son expérience au calcul afin d'éviter les erreurs systématiques. Certes, il n'est pas recommandé aux débutants de commencer par observer des couples serrés; mais il faut reconnaître que les étoiles doubles les plus intéressantes dynamiquement, et celles qui restent à découvrir, sont en majorité des binaires à composantes inséparables, même dans de grands instruments. Nos connaissances sur les masses passent automatiquement par le soin que nous apportons à interpréter la distance angulaire d'étoiles dont les images empiètent l'une sur l'autre.

Tableau I

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------|-----------------|---------|------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| d(r) Im. théor. | d(r) photoc. | IM / Im | Allong. image | Allong. isoph. 0,5 | d 50 cm Nice | d photoc.50 cm Nice | Aspect de l'image |
| 1 | 1 | 0,748 | | | 0",280 | 0",280 | Séparation |
| 0,95 | 0,91 | ,827 | 1,47 | | ,266 | ,255 | Tangence |
| ,90 | ,80 | ,902 | 1,45 | 2,08 | ,252 | ,224 | Huit |
| ,85 | ,64 | ,961 | 1,425 | 2,00 | ,238 | ,179 | Huit écrasé |
| ,80 | ,35 | ,995 | 1,40 | 1,90 | ,224 | ,098 | Bâtonnet étranglé |
| ,75 | 0 | 1 | 1,38 | 1,77 | ,210 | 0 | Bâtonnet |
| ,70 | | | 1,35 | 1,64 | ,196 | | Bâtonnet |
| ,60 | | | 1,30 | 1,42 | ,168 | | Olive |
| ,50 | | | 1,25 | 1,26 | ,140 | | A peine ovale |

1. Distance des composantes en fonction du rayon du disque d'Airy.
2. Distance des photocentres.
3. Intensité relative du milieu de l'image.
4. Allongement défini par le rapport du grand au petit axe.
5. L'isophote 0,5 correspond à la moitié de l'intensité maximum.
6. Séparations correspondantes pour la lunette de 50 cm de Nice.
7. Séparations des photocentres à la lunette de 50 cm de Nice.
8. Aspect de l'image avec un grossissement suffisant.

La figure (fig. 5-II en hors texte) reproduit les isophotes du centre de la tache de diffraction pour trois couples théoriques de séparation 0,9 rayon, un peu supérieure au pouvoir séparateur, puis égale, et enfin un peu inférieure (0,79). On note l'évidence des photocentres pour les deux plus écartés, et l'allongement considérable du centre de la tache dans l'autre. L'aspect du centre de l'image est plus révélateur que celui de l'image entière. Au premier coup d'oeil, l'observateur remarque l'aspect non simple d'une image d'étoile double très serrée par l'allure du centre de la tache, avant même de discerner l'allongement de l'ensemble.

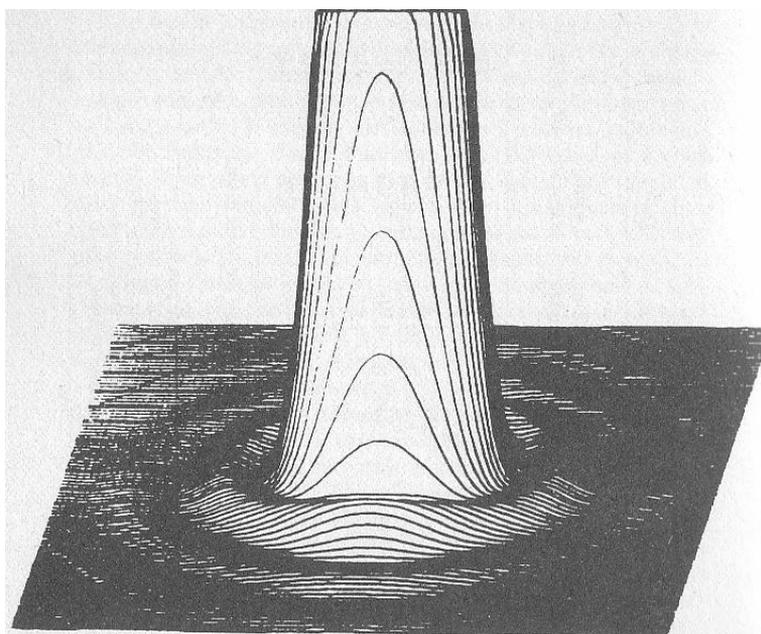


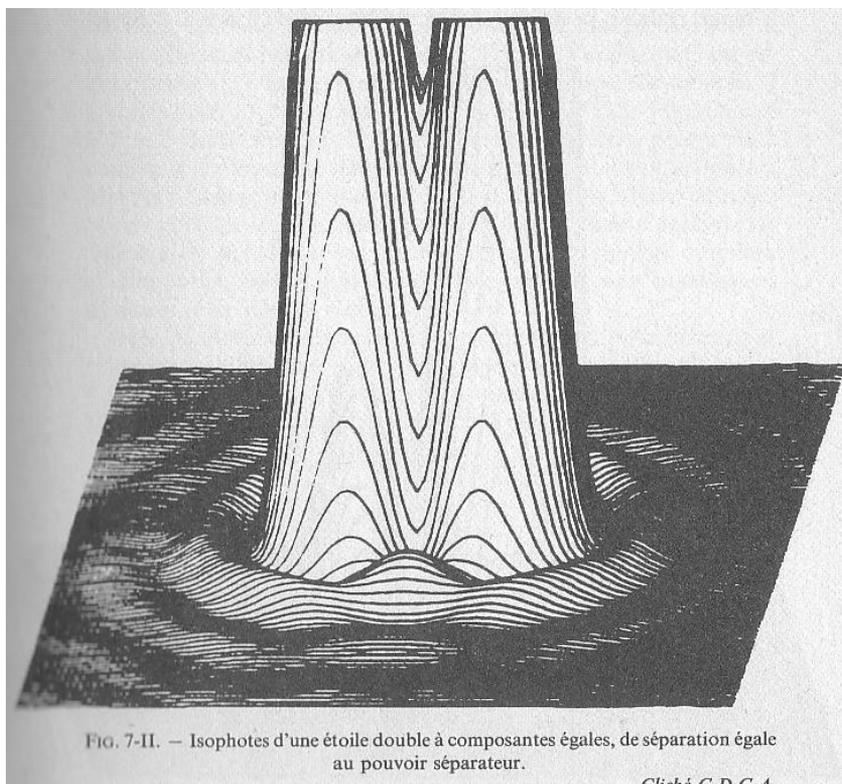
FIG. 6-II. — Isophotes d'une étoile double non résolue, à composantes égales.
Cliché C.D.C.A.

On note deux nœuds symétriques de lumière dans le premier anneau

A partir d'une distance de 0,79 rayon, l'image des deux étoiles ne présente qu'un seul photocentre; l'ensemble de l'image est allongé. Cet allongement peut se définir par le rapport du grand axe au petit axe de l'isophote zéro. Ce n'est pas nécessairement l'allongement de l'image ainsi défini qui frappe l'oeil, car près de l'isophote zéro l'intensité varie peu. C'est au niveau de l'isophote 0,5 qu'elle varie le plus rapidement; l'expérience nous a montré que c'est la forme de cet isophote qui reproduit le plus fidèlement l'allongement au sens visuel. Il est donné dans la cinquième colonne du tableau I. On voit qu'il est toujours supérieur à celui de l'ensemble de la tache, il est égal à 1,42 pour une séparation de 0,6 rayon : c'est l'allongement de la tache entière au niveau du pouvoir séparateur.

Cela permet de comprendre pourquoi les observateurs discernent et parviennent à mesurer des couples plus serrés que le pouvoir séparateur. Les isophotes tendent vers un même allongement pour une séparation de 0,5 rayon qui marque la limite de perception de duplicité. Cette limite est la moitié du rayon du premier anneau noir.

Les colonnes 6 et 7 du tableau I donnent les séparations angulaires des étoiles et des photocentres pour la lunette de 50 cm de Nice. La dernière colonne, fruit de plusieurs décennies d'observations de binaires très serrés, donne une description de l'aspect de l'image, valable pour des étoiles de magnitude 6 à 9,5 avec des grossissements suffisants qui atteignent quatre fois le grossissement résolvant.



Les nodosités dans le premier et deuxième anneau sont fortes. Le contraste de lumière entre le milieu de la tache et les images des composantes est bien visible.

Avant de terminer ce paragraphe, insistons sur la difficulté d'observation d'une étoile double serrée. L'agitation et l'étalement des images, dus à la turbulence atmosphérique, perturbent tellement la tache de diffraction que son examen et son interprétation sont souvent impossibles, et toujours délicats dès que l'ouverture de l'instrument atteint une trentaine de centimètres. Un observateur occasionnel ne verra qu'une tache bouillonnante là où un oeil exercé reconnaîtra un aspect caractéristique d'étoile double. C'est la raison pour laquelle il faut recommander aux amateurs de s'entraîner avec des instruments modestes; une ouverture de dix centimètres convient très bien, les images y sont stables, l'interprétation de la tache lumineuse beaucoup plus aisée. Il existe des listes de couples qui mettront l'observateur dans les conditions du tableau I. L'examen de couples comme ζ du Bouvier à $1''$,13, ζ du Cancer à $0''$,9, ξ du Scorpion à $1''$,24 et beaucoup d'autres, procurent à l'amateur le moyen de contrôler ses instruments et son aptitude à observer. Bien entraîné avec une modeste ouverture, l'amateur, qui se verra confier un instrument puissant, sera à même d'analyser les délicates et capricieuses images que montrent les colosses optiques, et d'apporter ainsi de précieuses informations aux calculateurs d'orbites et de masses stellaires.

Il reste à terminer ce chapitre par un rappel de ce qu'on entend par clarté d'un instrument, paramètre qui limite aussi la possibilité de l'observation, mais dont l'importance est moins grande ici que pour l'observation des planètes et en général des plages étendues.

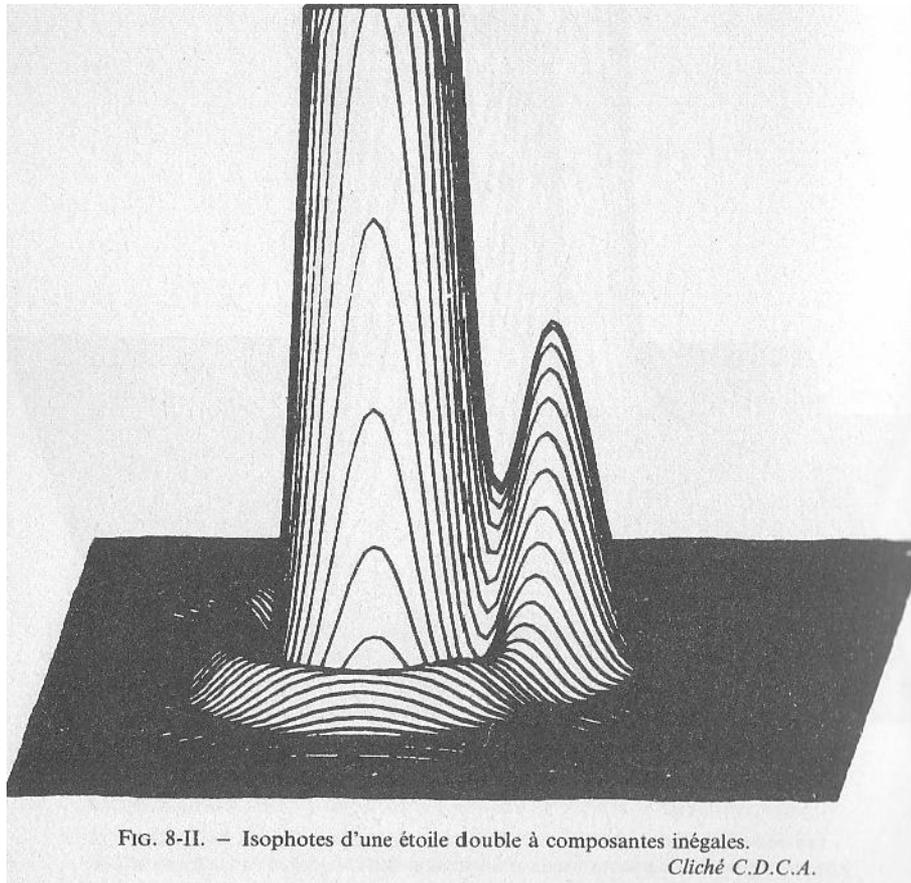


FIG. 8-II. — Isophotes d'une étoile double à composantes inégales.
Cliché C.D.C.A.

Clarté

La clarté est le gain de lumière apporté par un instrument par rapport à l'oeil nu. Il faut distinguer les sources ponctuelles (étoiles) et les sources étendues.

1) Dans le cas stellaire, la clarté est le rapport du flux de lumière collectée par l'instrument à celui qui entre dans la pupille. Si D et δ sont les ouvertures de l'instrument et de la pupille, on a :

$$C = (D/\delta)^2 = G_e^2 \quad (9, II)$$

Pour les étoiles la clarté est toujours supérieure à l'unité, elle est égale au carré du grossissement équipupillaire. Ainsi dans un télescope de 1 mètre d'ouverture, on voit les étoiles 27 800 fois plus lumineuses qu'à l'oeil nu. La magnitude limite visuelle s'écrit (A. Danjon et A. Couder)

$$M = 7,1 + 5 \cdot \text{Log } D$$

La clarté est indépendante du grossissement tant que ce dernier est compris entre G_e et $15G_e$, au-delà l'image ne peut plus être considérée comme ponctuelle.

2) Dans le cas de sources étendues, il faut distinguer l'observation visuelle et l'observation photographique.

En observation visuelle, la lumière collectée par l'ouverture se répartit sur l'image agrandie G fois et la clarté Γ s'écrit :

$$\Gamma = C/G^2 = (G_e/G)^2 \quad (10, II)$$

Cette clarté est donc inférieure à l'unité, contrairement à celle des étoiles, elle y est égale si on observe avec le grossissement équipupillaire. Les objets d'étendue sensible, vus à travers une lunette ou un télescope, sont moins brillants qu'à l'oeil nu ou au plus d'un éclat égal.

Ces considérations sont importantes lorsqu'on regarde le fond du ciel, des comètes ou des nébuleuses. C'est ainsi qu'à travers une lunette le fond du ciel est toujours plus noir qu'à l'oeil nu, et d'autant plus noir que le grossissement est plus élevé. Une comète ou une nébuleuse ne sera bien visible qu'avec un grossissement équipupillaire. Mais on ne pourra pas voir tous les détails que peut montrer l'objectif. Si on veut explorer un noyau de comète, par exemple, on forcera le grossissement, mais la chevelure et la queue de la comète ne seront plus visibles. Sur une nébuleuse où les détails sont peu contrastés, l'observation visuelle est fort décevante.

L'observation terrestre est la plus agréable avec un grossissement équipupillaire ou peu supérieur, sinon on perd de la brillance. La visibilité des silhouettes, la nuit, ne peut se faire qu'avec ce grossissement. Dans ce cas on ne verra pas mieux les contrastes qu'à l'oeil nu, mais on verra l'image agrandie, donc plus de détails. C'est une erreur souvent commise par les débutants de forcer le grossissement de leur instrument pour mieux voir un paysage.

C'est le cas dans l'observation des planètes, qui exige à la fois une bonne résolution et un contraste aussi élevé que possible entre les taches du disque. Ces deux conditions sont contradictoires. Un disque planétaire sera donc vu très différemment suivant l'oculaire. Ainsi les détails lunaires fortement contrastés peuvent supporter de forts grossissements, tandis qu'il n'en est pas de même pour les planètes Mars ou Saturne peu contrastées. On se rendra compte de la différence du contraste donné par deux instruments, en armant du même grossissement l'instrument et son chercheur. A travers les deux objectifs on verra la planète sous le même angle; mais le grand instrument donne plus de contraste que l'autre où le disque paraît terne et délavé.

Nous n'insisterons pas sur l'observation photographique des plages étendues. Disons seulement que la clarté Γ_p est proportionnelle à la surface de l'objectif et inversement proportionnelle à la surface de l'image. A la différence de l'observation visuelle, on travaille sur des images et non sur des angles. On peut donc écrire

$$\Gamma_p = (D/F)^2 = 1/m^2 \quad (11, II)$$

Dans l'observation photographique, la clarté est égale à l'inverse du carré du rapport d'ouverture. Deux objectifs de même rapport ont la même clarté; il leur faut le même temps de pose pour photographier un astre d'étendue sensible, ou le fond du ciel. Mais le plus grand des deux donne une image plus grande.

Deux clichés de la même partie du ciel, pris avec deux objectifs de même dimension mais de rapports d'ouverture différents, ne sont pas semblables. L'instrument à courte distance focale met en évidence les nébuleuses, mais est plus sensible à l'éclairement du fond du ciel, l'autre montre une structure plus fine, mais au détriment du contraste.

Le tableau suivant résume l'ensemble de ce qui précède.

TABLEAU II

| | | | | | |
|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Ouverture cm | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 |
| Pouv. sép | 2",4 | 1",2 | 0",24 | 0",12 | 0",08 |
| Magn. lim. visuelle | 10,6 | 12,1 | 15,6 | 17,1 | 18,0 |
| G équip | 8 | 17 | 83 | 167 | 250 |
| Champ sur 40° | 5° | 2°20' | 29' | 14' | 10' |
| G résolv | 24 | 51 | 250 | 500 | 750 |
| Champ sur 40° | 1°,7 | 47' | 10' | 4',8 | 3',2 |
| G maxi | 125 | 250 | 1 250 | 2 500 | 3 750 |
| Champ sur 40° | 20' | 9' | 1',9 | 1' | 36" |

Le tableau donne pour quelques ouvertures, le pouvoir séparateur, la magnitude visuelle limite, les grossissements équipupillaires, résolvants et maxima, avec les champs correspondants.

BIBLIOGRAPHIE RESTREINTE

- G. BRUHAT. — Optique. 5ème édition revue et complétée par A. Kastler, 1959, Masson.
 A. DANJON et A. COUDER. — Lunettes et Télescopes. Editions de la Revue d'Optique théorique et expérimentale, 1935.
 M. FRANÇON. — Optique: formation et traitement des images, 1972, Masson.
 A. MARÉCHAL. — Diffraction. Structure des images, 1970, Masson.

LES APPAREILS DE MESURES

MESURES VISUELLES

Principe de la mesure d'une étoile double

Mesurer une étoile double consiste à déterminer les coordonnées polaires du compagnon par rapport à l'étoile principale prise pour origine.

L'origine des angles est la direction du Nord céleste. Cette origine ne correspond pas à un phénomène observable dans le champ de l'instrument. Il eût été plus logique de prendre la trajectoire Est-Ouest d'une étoile équatoriale dans son mouvement diurne, comme W. Herschel le faisait au XVIII^{ème} siècle. On détermine donc soigneusement ce mouvement diurne en regardant plusieurs fois une étoile glisser sur le fil du micromètre. Dans les montures équatoriales ce mouvement est solidaire du devant de lunette, on peut le repérer une fois pour toutes, quitte à le vérifier de temps en temps. La direction Nord-Sud est perpendiculaire à celle du mouvement diurne.

Le champ de l'instrument est divisé en quatre quadrants. Le premier va du Nord à l'Est (0 à 90°), le deuxième de l'Est au Sud (90 à 180°), le troisième du Sud à l'Ouest (180 à 270°) et le quatrième de l'Ouest au Nord (270 à 360°) (fig. 1-III).

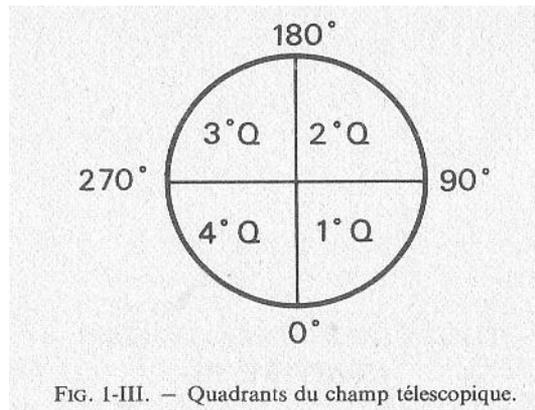


FIG. 1-III. — Quadrants du champ télescopique.

L'angle entre la ligne des composantes du couple et la direction du Nord céleste s'appelle angle de position, (fig. 2-III), on le désigne généralement par la lettre grecque θ . L'écartement des composantes, appelé séparation ou distance, se mesure en secondes de degré, il est généralement désigné par la lettre grecque ρ . Une mesure complète comprend l'époque en années et fraction d'année, l'angle de position θ et la séparation, ou distance ρ .

Le rôle du micromètre est de permettre de mesurer l'angle de position et l'écartement.

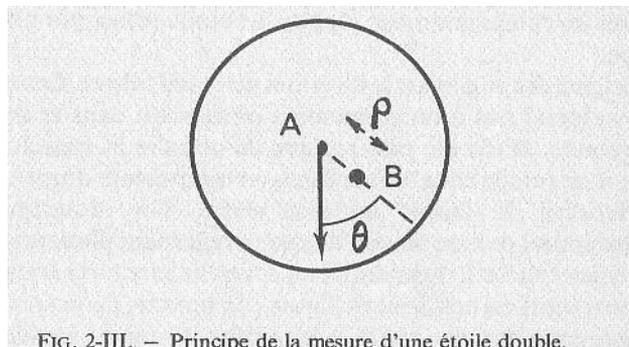


FIG. 2-III. — Principe de la mesure d'une étoile double.

A, B sont les composantes, la flèche indique le Nord, θ et ρ sont les paramètres de mesure.

Précautions à prendre pour repérer l'origine des angles

Il ne faut pas oublier que le mouvement diurne des étoiles n'a pas lieu sur des grands cercles de la sphère, sauf pour les astres situés sur l'équateur céleste, il en résulte que les étoiles ne suivent pas une droite dans le champ instrumental. En toute rigueur, on ne peut matérialiser le mouvement diurne par un fil tendu. La différence est petite et insensible assez loin du pôle, près duquel il ne convient pas de régler un micromètre.

On fera bien de s'assurer de la bonne orientation de l'axe horaire. Un décalage de quelques minutes de degré est déjà sensible sur les mesures d'angle de position. Comme l'observation des étoiles doubles doit se faire au voisinage de la culmination des étoiles, c'est le décalage Est-Ouest de l'axe horaire qui peut jouer un rôle important. Il est facile de s'en apercevoir et de le corriger, car la réfraction n'intervient pas. On procède de la façon suivante. On pointe une étoile proche de l'équateur et du méridien, on la fait coïncider avec un des fils du micromètre orienté Est-Ouest, et on met en marche l'entraînement. Si l'axe horaire est bien réglé, l'étoile reste sur le fil. Mais si au bout de quelques minutes, elle se déplace vers le haut ou vers le bas, c'est qu'il y a un décalage. En effet, la lunette, dans son mouvement, suit un cercle dont le pôle est la trace sur le ciel du prolongement de l'axe horaire, tandis que l'étoile suit un cercle centré sur le pôle réel. On peut mettre le problème en équations, mais c'est inutile, car ce qui nous intéresse est de supprimer le décalage, non d'en connaître la valeur. Si l'étoile dérive vers le Nord, c'est qu'il y a un décalage vers l'Ouest; on agit en conséquence sur les vérins au pilier de l'instrument. Bien entendu, le réglage complet d'un équatorial comprend beaucoup d'autres opérations qu'on trouvera décrites en détails dans les monographies de l'Observatoire royal de Belgique par S. Arend (1951). Théoriquement un instrument une fois mis en station ne se dérègle pas, mais les tassements du sol et les microséismes peuvent, au cours de décennies, modifier légèrement l'orientation des axes.

Un grand nombre de micromètres ont été imaginés. Nous n'étudierons ici que ceux qui ont été utilisés à mesurer des étoiles doubles et qui se réduisent à quatre sortes :

- les micromètres à fils,
- les micromètres à étoiles de comparaison,
- les micromètres interférentiels,
- les micromètres à double image.

Les micromètres à fils

Le principe de cet appareil remonte à Auzout au XVIII^e siècle. La difficulté de sa réalisation mécanique en a retardé l'application pratique jusqu'à W. Struve au XIX^e siècle. Avant cette époque on ne disposait que de la lunette méridienne pour repérer la position des astres, mais elle se prête mal à la mesure de petits angles. Les observations vraiment utilisables d'étoiles doubles datent d'un siècle et demi.

Un micromètre à fils se compose essentiellement d'un cadre métallique mobile le long de deux glissières parallèles formant les grands côtés d'un rectangle (fig. 3-III). Les surfaces du cadre et des glissières sont coplanaires, elles doivent travailler dans le plan focal. Une croisée de fils très fins est tendue au milieu des côtés du cadre mobile, un autre fil très fin est tendu entre les glissières, de sorte que l'un des fils du cadre lui soit exactement parallèle. Le cadre est mobile le long des glissières, sa position est repérée par un comparateur ou une vis micrométrique terminée par un tambour divisé. L'ensemble de l'appareil tourne à frottement doux autour de l'axe optique. Les fils proviennent de cocons d'araignées ou de certaines chenilles; l'industrie fournit maintenant des fils de nylon ou de quartz insensibles à l'humidité et au vieillissement, le diamètre de ces fils est de l'ordre de sept microns. Dans certains micromètres récents, la vis ne sert qu'à assurer le déplacement du cadre dont la position est repérée par une jauge électronique reliée à un compteur affichant et imprimant les déplacements en microns.

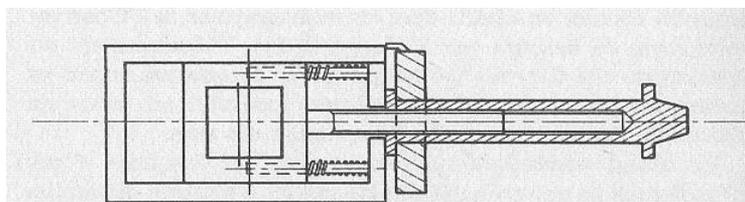


FIG. 3-III. — Schéma d'un micromètre à fils.

On remarque les deux fils parallèles, dont l'un est lié au chariot mobile commandé par une vis à tambour divisé.

(Figure extraite de *Lunettes et télescopes*, A. Danjon et A. Couder.)

Quelques observateurs, comme R. Jonckheere, préféraient un micromètre à fils obliques. Dans ce dispositif (fig. 4-III), le cadre mobile porte deux fils faisant entre eux un petit angle se coupant au centre du cadre. Les glissières portent un fil perpendiculaire à la bissectrice du petit angle, la mesure consiste à maintenir l'image d'un couple d'étoiles sur le fil fixe et à manoeuvrer le cadre mobile jusqu'à ce que les côtés de l'angle coïncident avec les images. On répète l'opération de chaque côté du sommet de l'angle. On a ainsi à la fois la mesure de séparation et d'angle de position.

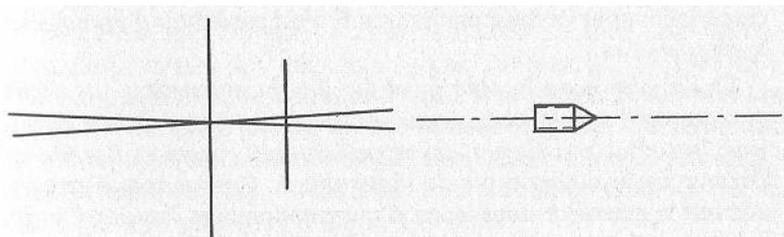


FIG. 4-III. — Principe du micromètre à fils obliques.
Les deux fils obliques, liés au chariot mobile, sont entraînés devant un fil perpendiculaire à l'axe de la vis.
(Figure extraite du *Journal des observateurs*, R. Jonckheere.)

Tel est le principe fort simple du micromètre à fils. Sa réalisation mécanique est délicate, car, d'une part, tous les fils sont par définition dans le même plan, ce qui est mécaniquement impossible, d'autre part aucun jeu n'est tolérable dans le glissement du cadre mobile, ni dans la rotation de la vis.

On ajuste les fils dans un même plan par réglage fin de l'inclinaison des glissières par rapport au plan du cadre mobile. C'est la profondeur de champ des oculaires qui impose une limite au décalage des plans. Avec un oculaire de six mm de distance focale, la tolérance est d'une cinquantaine de microns. Le jeu du cadre est compensé par des ressorts, le temps mort de la vis n'a plus d'effet lorsque la mesure est faite par une jauge électronique.

Le repérage des fils à travers l'oculaire se fait soit par l'éclairage du champ, soit par celui des fils. L'éclairage du champ est réalisé simplement en projetant de la lumière sur l'objectif à l'aide d'une lampe de puissance réglable située non loin de l'oculaire. L'éclairage réglable des fils se fait par une petite source lumineuse située dans le plan des fils en bout de micromètre.

La mesure de l'angle de position se fait par estimation visuelle du parallélisme entre le fil fixe et la ligne des deux composantes, on refait plusieurs fois la mesure en tournant le micromètre autour de l'axe optique. Pour mesurer l'écartement, on bissecte chaque composante avec les fils parallèles, après les avoir orientés perpendiculairement à la ligne des composantes. On reprend la bissection en permutant les fils à l'aide du tambour divisé. La différence de lectures du tambour est proportionnelle à l'écartement en secondes de degré.

Les précautions à prendre dans l'emploi du micromètre à fils sont essentielles pour de bonnes mesures. Il n'est pas inutile d'en rappeler quelques-unes.

1) La mise dans le plan focal des fils du micromètre. — Deux sources d'erreurs systématiques sont ainsi évitées; l'effet de parallaxe introduit par la non-superposition des images et des fils, et l'erreur de distance focale de l'instrument. Ces sources d'erreurs, surtout la première dans le cas d'images éloignées l'une de l'autre, sont importantes et peuvent atteindre 10 pour 100 de la mesure. On se rend compte de l'effet de parallaxe en regardant l'image près du fil et en bougeant la tête. Si la mise au foyer est incorrecte, ce qui est assez fréquent dans les réticules des chercheurs, l'étoile et le fil ne semblent pas garder la même position relative. Il faut donc s'assurer d'une mise au foyer correcte en mettant l'oculaire au point sur les fils, puis le micromètre sur l'image stellaire. La tolérance de mise au foyer d'une grande lunette est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre.

2) Le tarage de la vis micrométrique. — Jusqu'à une époque récente, les micromètres à fils étaient tous munis de vis micrométriques. Ce principe est illogique, car la vis micrométrique entraîne le chariot et repère son déplacement ce qui est incompatible, car un appareil de mesure ne doit pas travailler, sinon il s'use. Les erreurs d'une vis sont périodiques (usure du pas), fonction de la portion de vis utilisée (étirement) et de la température.

Leur tarage est délicat, il consiste à savoir à combien équivaut le pas en secondes de degré. On a d'abord une très bonne estimation en divisant la valeur du pas par la distance focale exprimée dans la même unité. On a ainsi la valeur approchée en radians, on passe aux secondes d'arc en multipliant par 206 265. Le tarage fin se fait par l'observation répétée de couples d'écartement bien connu, ou bien par le temps que met une étoile à parcourir un intervalle compris entre deux fils séparés par un nombre connu de tours de vis. De

bonnes photographies de champs stellaires, comme les Pléiades, donnent la distance focale et la valeur du micron en secondes de degré.

Actuellement il convient d'utiliser un comparateur au lieu d'une vis micrométrique. On trouve dans le commerce de bons appareils gradués de dix en dix microns avec lecture facile au micron. Les lunettes de 50 et 74 cm de l'observatoire de Nice comportent, en plus des vis micrométriques, des comparateurs et des jauges électroniques. De plus ces appareils peuvent se changer aisément, car ils sont extérieurs au micromètre. Leur usage élimine les sources d'erreurs propres aux vis.

3) L'éclairage des fils. — Les oculaires ne sont pas achromatiques, ils ont des distances focales différentes, quoique très voisines, pour chaque longueur d'onde. Il faut donc éclairer les fils en lumière blanche, sinon on a une mise au point différente sur l'étoile et le fil; cette erreur porte le nom d'aberration de grandeur. Elle est supprimée dans le cas d'éclairage du champ, mais les étoiles de faible éclat sont plus difficiles à observer.

L'éclairage des fils est une source de lumière parasite. Celle-ci s'appuie sur la pupille de sortie de l'oculaire et non seulement sur le cercle oculaire comme la lumière des astres. On doit donc veiller à ce que les pupilles de sortie des oculaires ne dépassent pas notablement en dimension celle du cercle oculaire. Cette condition est rarement vérifiée dans les oculaires du commerce.

4) Le contrôle du parallélisme entre les fils et les alignements d'étoiles. — Lors de la mesure d'un angle de position, l'observateur doit toujours mettre la ligne des yeux parallèle ou perpendiculaire à l'alignement des étoiles. Ce n'est pas toujours aisé, car certains angles exigent une position pénible de la tête. Certains observateurs utilisent un prisme à réflexion totale qui modifie l'angle de position d'une quantité connue. Mais c'est une perte de lumière et une complication dans la monture de l'oculaire; ces prismes compensateurs ne sont plus guère employés.

5) Le contrôle de la bissection. — Le principe de la mesure consiste à bissecter l'image d'une étoile par un fil. Cette opération est délicate à cause des mouvements de la monture ou d'origine atmosphérique, qui atteignent souvent une fraction notable des distances à mesurer.

Lors de la mesure, les images doivent être maintenues dans la même région du champ, si possible près du milieu, afin d'éviter l'erreur importante de défaut de parallélisme des fils. La bissection devient impossible si les images ne sont pas complètement séparées, on est limité par la diffraction. Les observateurs d'étoiles doubles connaissent trop bien ces difficultés. Il est malaisé de mesurer la séparation dès que la turbulence atmosphérique associée à la diffraction ne permet plus de voir distinctement les composantes du système. Si la turbulence est très faible, on a une bonne estimation de la séparation par l'aspect de la figure d'Airy, mais ce n'est plus une mesure micrométrique.

Les micromètres à fils sont utilisés par la majorité des observateurs, au moins les neuf dixièmes, car leur principal avantage est de laisser intacte l'image donnée par l'objectif. Mais ces appareils n'ont pas l'impersonnalité des micromètres modernes interférométriques ou à double image. Ils exigent des années de pratique avant d'arriver à de bons résultats, tant l'interprétation de la bissection de l'image est délicate. La mesure d'une étoile double est un travail signé dont la qualité dépend davantage du soin de l'observateur que de la puissance de son instrument. Leur avantage sur la technique photographique est évident pour la mesure des images qu'on peut voir mais non photographier.

Les micromètres à étoiles de comparaison

Nous n'insisterons pas sur ces appareils qui, à notre connaissance, ne sont plus employés: On en trouvera une bonne description sous la plume de P. Baize (1949).

On forme deux étoiles artificielles d'écartement et d'orientation variables et repérables que l'on compare au couple à mesurer. Dans le dispositif de Davidson et Symms (1931), une source ponctuelle de lumière traverse un prisme de Wollaston et se divise en deux images dont l'écartement est lié à la distance entre la source et le prisme; des nicols croisés font varier l'éclat des images. L'ensemble peut tourner autour d'un axe et les images sont envoyées dans la lunette par un jeu de réflexions. Ce dispositif très ingénieux n'a pourtant pas fait école, même les auteurs s'en sont très peu servis.

Par contre le micromètre de M. Duruy (1937) a été utilisé par son auteur pendant plusieurs années. C'est un système binoculaire : un oeil regarde dans la lunette, l'autre oeil dans un viseur où se trouve l'image réglable d'une étoile double artificielle formée de deux points blancs. Malgré la complexité physiologique de la mesure (un oeil observe et l'autre compare), les observations ont été nombreuses et concernent souvent des objets difficiles pour la lunette de 25 cm dont se servait l'auteur.

Les micromètres interférentiels.

Le micromètre de Fizeau-Michelson

Les micromètres à étoiles de comparaison, comme les micromètres à fils sont d'un emploi malaisé lorsque les composantes sont trop proches pour être vues séparément. Fizeau eut alors l'idée d'adapter devant l'objectif le dispositif des trous de Young qui donne des franges d'interférence d'une source ponctuelle.

Dans ce but, on place devant l'objectif, ou en avant du plan focal pour réduire l'encombrement, un écran percé de deux ouvertures égales et symétriques par rapport à l'axe optique et d'écartement réglable D . Dans le plan focal la lumière provient de chaque ouverture. Pour une orientation donnée, la différence de marche est fonction de la distance à l'axe optique, on observe donc des franges.

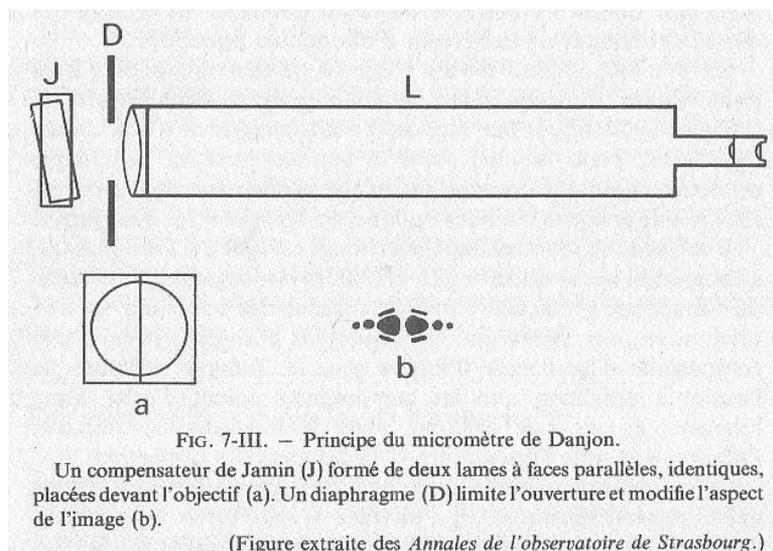
Il est facile de montrer que l'interfrange est égal à $1/D$ en radians, à comparer avec la valeur $1,22 \cdot \lambda/D$ du rayon angulaire de la tache de diffraction. En faisant varier la distance des ouvertures et leur orientation, on peut faire coïncider les franges noires d'une composante d'un couple d'étoiles avec les franges brillantes de l'autre, à condition que les composantes soient d'éclat assez lumineux et pas trop différent. Ainsi les franges disparaissent, l'observateur note l'orientation et la distance des ouvertures.

Ce micromètre permet d'accéder à des séparations plus petites que le pouvoir séparateur. Il a permis à W. S. Finsen, notamment, de découvrir des couples excessivement serrés, dont l'un a la plus courte période connue comme double visuelle (1,59 ans). D'autres observateurs, comme H. M. Jeffers, ont obtenu des résultats non moins excellents. Ces qualités sont contrebalancées par un manque de luminosité de l'appareil qui intercepte la majeure partie de flux de lumière pénétrant dans l'objectif et par la multiplicité des franges qui diminue encore le contraste.

Ces considérations ont amené A. Danjon à concevoir un micromètre interférentiel plus lumineux et à frange unique (1937).

Le micromètre interférentiel à demi-onde

Un compensateur de Jamin, formé de deux lames de verre à faces parallèles inclinées mutuellement d'un petit angle, est placé devant l'objectif. Par suite de la petite différence d'inclinaison, il y a un déphasage de la lumière à la sortie des lames. On s'arrange pour que la différence de marche soit d'une demi-longueur d'onde. L'aspect de l'image devient une double tache lumineuse à frange noire centrale. Un diaphragme placé devant l'objectif en limite le contour. Les dimensions angulaires de la double tache sont inversement proportionnelles à l'ouverture du diaphragme. L'ensemble peut tourner autour de l'axe optique. Pour donner un aspect plus pur à l'image de diffraction, le diaphragme est un carré.



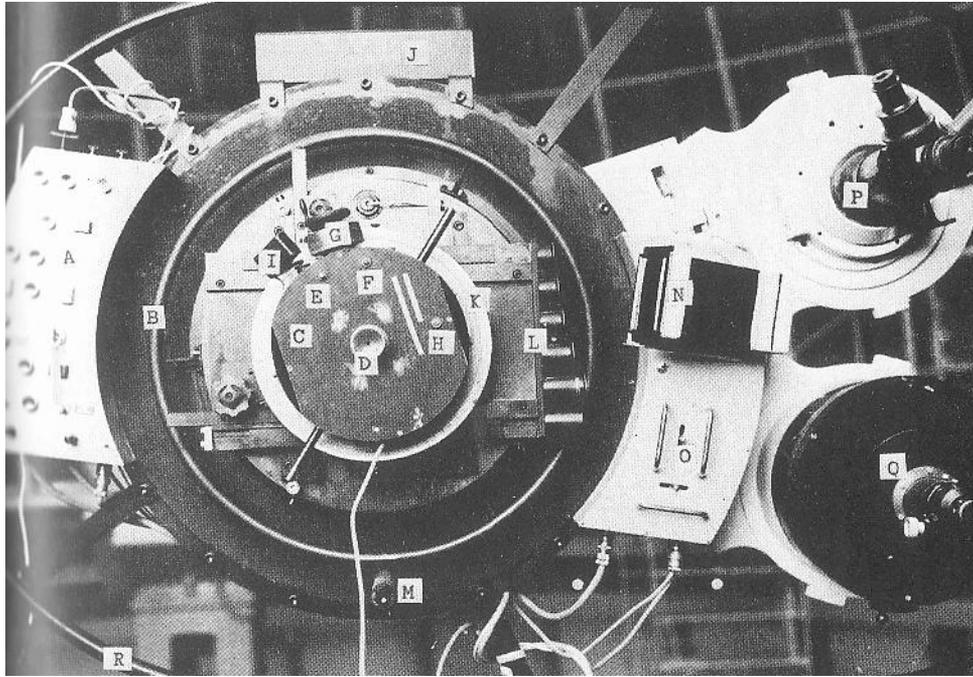
Une étoile double donne un système de deux images à frange noire. En orientant correctement l'appareil et en ouvrant le diaphragme progressivement, on observe d'abord une frange pure qui s'estompe et disparaît lorsque la double image accuse la même séparation que le couple, ce qui a lieu pour :

$$\rho = 0,77 \cdot \lambda/d \quad (1, \text{III})$$

d étant la longueur du côté du diaphragme. La séparation minimum a lieu lorsque l'objectif circonscrit le diaphragme et on a :

$$\rho_{\min} = 1,09 \cdot \lambda/d \quad (1 \text{ bis, III})$$

D étant l'ouverture. On atteint ainsi presque le pouvoir séparateur de l'objectif.



3 — Devant de la lunette de 74 cm.

A Boîtier où sont rassemblés les commandes de mouvement et du tambour. d'éclairage de la coupole, les verrouillages et déverrouillages pneumatiques en déclinaison et droite, les rappels, l'éclairage des cercles et du fond de ciel

B Volant de mise au foyer.

C Boîtier du micromètre à fils.

D Oculaire de 25 mm en place, avec anneau de mise au point

E Réglage de l'éclairage des fils du micromètre

F Réglage de l'éclairage du cercle de position et du tambour

G Tambour de vis micrométrique

H Éclairage du cercle de position et du tambour

I Lecture du tambour.

J Magnétophone.

K Cercle de position et dispositif de réglage

L Barillet porte-oculaires

M Viseur en déclinaison.

N Affichage de l'écartement des fils du micromètre.

O Manches à balai de manoeuvre rapide en ascension droite et déclinaison

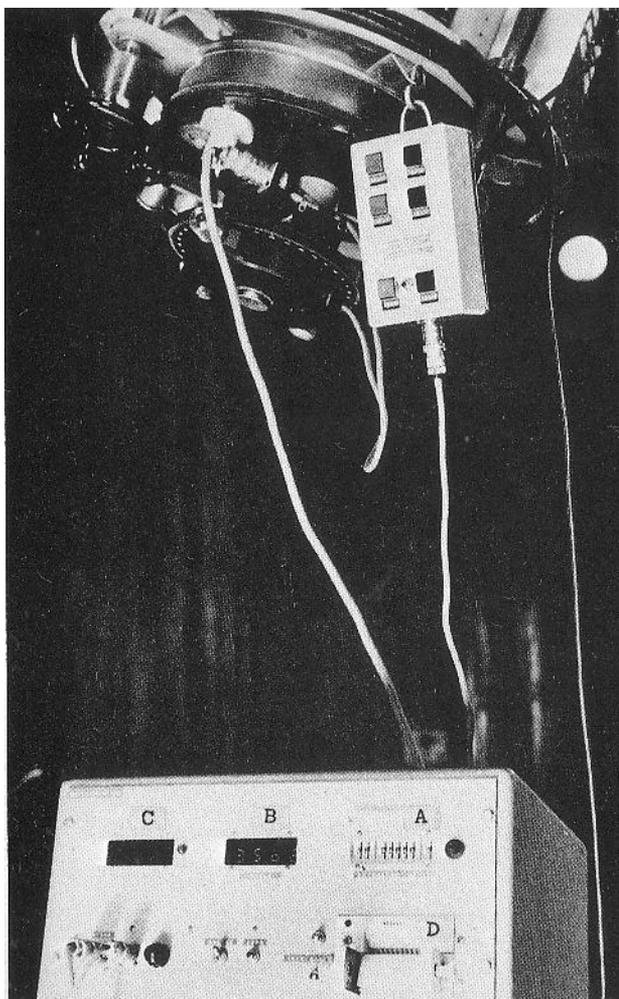
P Chercheur de 25 cm

Q Lunette guide

R Volant de sécurité.

Les mouvements de rappel et la commande de magnétophone se trouvent aussi sur une raquette non visible sur la photographie.

Cliché Observatoire de Nice



4 — Observatoire de Nice. Lunette de 50 cm. Enregistrement des observations.

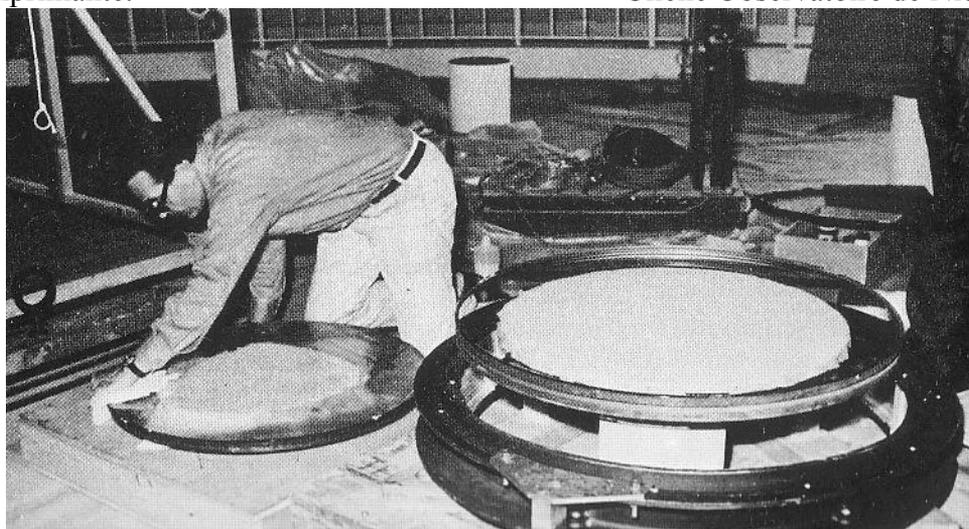
A Identification de l'astre.

B Affichage des angles de position.

C Affichage des séparations angulaires.

D Imprimante.

Cliché Observatoire de Nice



5 — Montage de l'objectif de 74 cm le 29 mai 1969. J. Texereau met en place les verres dans le barillet.

Cliché Observatoire de Nice

Le micromètre à double image de Paul Muller

La théorie de cet appareil, imaginé dès 1937, a été faite en 1947. Nous insisterons un peu plus sur lui, car il est assez largement répandu, grâce à sa facilité de construction.

P. Muller place deux demi-prismes biréfringents au voisinage du plan focal de l'objectif. Ces demi-prismes, collés entre eux, ont leurs axes contenus dans le plan de section principale. Ces axes font un angle de 45° par rapport aux faces d'entrée et de sortie du biréfringent. Il en résulte que le rayon lumineux qui attaque presque normalement le prisme se divise en deux rayons, ordinaire et extraordinaire, qui émergent parallèlement en gardant une distance variable selon le déplacement latéral du prisme.

Il est facile de montrer qu'il en est ainsi. Soit (fig. 8-III) OI le rayon ordinaire et OME le rayon extraordinaire qui se réfracte en α sur la face d'entrée, en 2α sur les faces collées et de nouveau en α sur les faces de sortie. Soit $AB = 2.l$ l'épaisseur du double prisme. Projétons M en H sur OI et posons $OA = x$. Cette quantité mesure le déplacement du prisme. L'angle α est petit, on peut donc écrire, en se limitant au premier ordre:

$$OM = OH = x \cdot \tan p = x, \text{ car } p = 45^\circ$$

puis M' étant la projection de M sur la face de sortie,

$$EI = EM' - IM' = EM' - HM.$$

Or $HM = \alpha \cdot x$ et $EM' = (2 \cdot l - x) \cdot \alpha$, puisque $p = 45^\circ$, donc,

$$EI = 2 \cdot l \cdot \alpha - 2 \cdot \alpha \cdot x \quad (2, \text{ III})$$

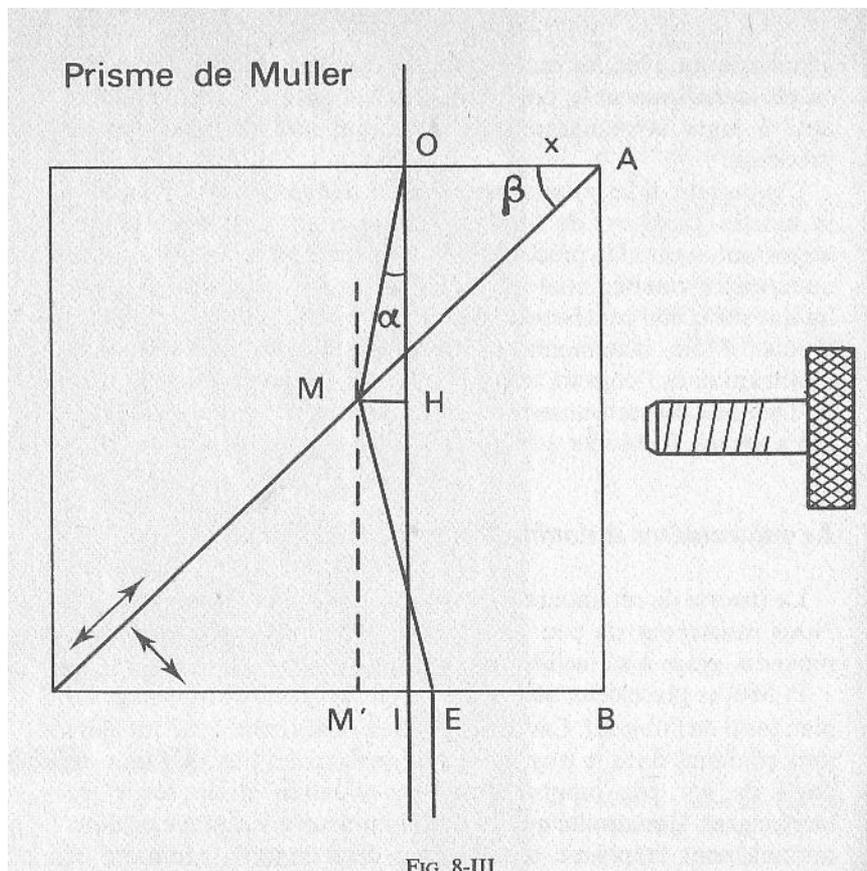


FIG. 8-III.

Deux prismes de quartz collés, d'axes optiques normal et parallèle au plan de coupe d'angle β avec la face incidente. Le pinceau lumineux extraordinaire chemine en O, M, E et sort parallèle au pinceau ordinaire. Leur écartement est proportionnel au déplacement $OA = x$ commandé par une vis à tambour divisé.

Un calcul rigoureux donne:

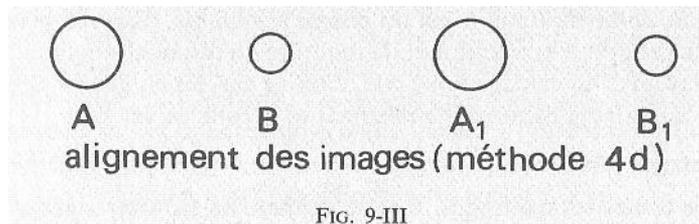
$$EI = 2 \cdot l \cdot \tan \alpha - 2 \cdot x \frac{\sin p}{\cos(p + \alpha)} \sin \alpha \quad (2 \text{ bis, III})$$

La quantité $\gamma = 2 \cdot \alpha = 2(n_o - n_e)/n_o$ est une constante, n_o et n_e étant les indices ordinaire et extraordinaire du prisme de Muller en quartz. L'inverse de cette constante s'appelle le grandissement et vaut 84,0. On remarque que $EI = 0$ pour $x = 1$.

Les images sont en coïncidence au milieu de la face d'incidence du prisme, le dédoublement de l'image est proportionnel au déplacement du prisme avec un facteur γ . Tout se passe comme si le tour de vis est divisé par le grandissement. Si T_o est le nouveau tour de vis, on a :

$$T_o = \gamma \cdot T. \quad (3, III)$$

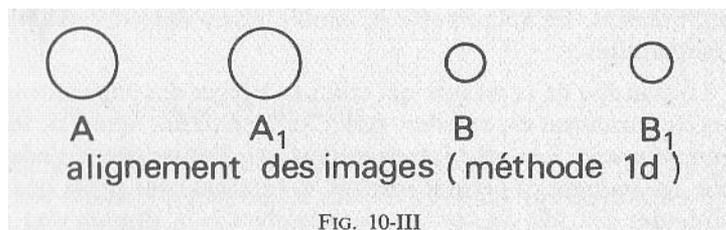
Mais le dédoublement n'est pas le même pour les étoiles du champ, il n'est donc pas rigoureusement le même pour les deux composantes d'un couple. Cet effet porte le nom d'effet micrométrique différentiel.



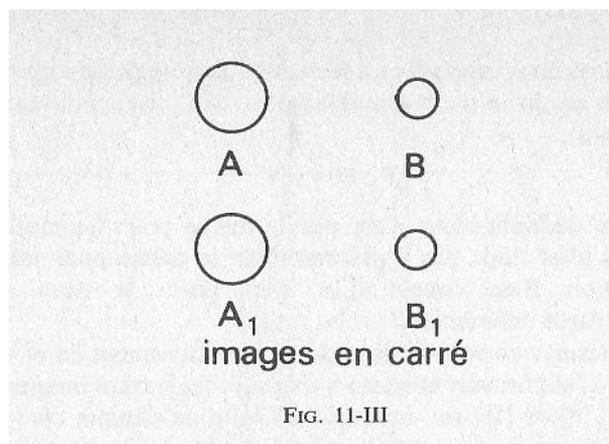
Pour mesurer un couple, on procède par alignement ou on forme un carré. L'alignement consiste à disposer les quatre images A, B et A1, B1 (fig. 9-III) sur une même droite de chaque côté de la coïncidence et à les rendre équidistantes, soit en séparant complètement les quatre images (méthode 4d), soit en les intercalant (méthode simple distance, fig. 10-III). A cause de l'effet micrométrique, l'équidistance rigoureuse est impossible, mais l'écart est insensible à l'oeil et le tour de vis s'écrit :

$$T_1 = T_o(1 - \gamma/2) \quad (4, III)$$

L'angle de position se mesure avec une grande précision par la méthode de l'alignement.



Si on utilise la disposition en carré, l'effet micrométrique ne joue pas et le tour de vis reste T_o . La disposition en carré (fig. 11-III) est commode pour mesurer les couples serrés.



On peut annuler l'effet micrométrique différentiel en utilisant un prisme compensateur. C'est un prisme semblable, mais retourné et assez petit pour être logé dans la monture du dispositif oculaire. On montre par un calcul simple que, dans ce cas, les étoiles du champ ont à peu près le même dédoublement et le tour de vis vaut

$$T_o = \gamma \cdot T$$

pour toutes les méthodes. Il reste néanmoins en toute rigueur un petit effet micrométrique dû à l'inclinaison différentielle du faisceau sur le prisme. Cet effet n'atteint jamais le millième de la quantité à mesurer. Enfin signalons que le dispositif oculaire est un microscope, car le plan focal passe à l'intérieur du prisme et ne permet pas un grossissement suffisant aux oculaires ordinaires.

On construit facilement et pour une somme modique cet appareil, en plaçant le prisme à la place des fils dans le cadre d'un micromètre ordinaire et en remplaçant l'oculaire par un microscope. A cause de cela le champ ne dépasse pas une minute de degré, ce qui n'est pas un inconvénient. Le micromètre de Muller existe dans de nombreux observatoires.

Le principe de la mesure qui consiste à juger des alignements et des équidistances est excellent pour l'oeil tout à fait apte à de telles comparaisons. Les résultats montrent que l'observateur s'adapte vite, ils donnent des écarts internes et externes plus petits que les méthodes par fils, ils sont moins sensibles à la dégradation des images. L'usage de ce micromètre s'étend à des couples plus faibles que ceux accessibles aux micromètres interférentiels, car toute la lumière pénétrant dans l'objectif est utilisée.

Comme les faisceaux de sortie sont polarisés à angle droit, il suffit d'ajouter un polaroïd entre le prisme et le microscope pour transformer l'appareil en photomètre. En tournant le polaroïd, on égalise l'intensité des images deux à deux. On ramène les mesures de différence de magnitude à une lecture d'angles. On peut faire les observations dans certaines bandes spectrales (filtres). P. Muller a fait de nombreuses observations photométriques avec cet instrument.

Le micromètre à double image de B. Lyot et H. Camichel

C'est un micromètre à double image formé d'une lame de spath à faces parallèles inclinée sur l'axe optique de l'instrument. L'orientation de la lame et son inclinaison font connaître l'angle de position et la séparation d'un couple par comparaison avec le dédoublement dû à la biréfringence, mais le dédoublement n'est pas proportionnel aux lectures. Les auteurs ne donnent aucune autre indication sur cet appareil qui a été en usage à l'observatoire du Pic du Midi (1949). Ce micromètre, d'exécution fort simple, mériterait une large diffusion, il permet des mesures très précises.

L'OBSERVATION PHOTOGRAPHIQUE DES ÉTOILES DOUBLES

Nous ne dirons que quelques mots sur ce sujet qui fait partie de l'astrométrie photographique, mais non de l'observation visuelle.

Chambre optique à photons

La photographie se prête mal à l'observation des couples serrés, car les étoiles forment sur la plaque des taches plus grandes que l'image de diffraction. Cette dernière atteint une vingtaine de microns dans les instruments à grande distance focale, mais la tache photographique atteint souvent cent microns. On peut agrandir l'image avant de l'envoyer sur la plaque, mais tout système optique comporte des constantes, parfois difficiles à déterminer. Si bien que l'astrométrie photographique se fait au foyer de lunettes, dont la distance focale est bien connue, ou au foyer primaire de certains télescopes.

Pour les distances inférieures à cent microns, les images empiètent l'une sur l'autre, elles sont plus ou moins confondues. Dans ce cas, en examinant la tache photographique, on remarque un maximum de lumière : le photocentre. La position du photocentre ne correspond ni à celle d'une des composantes, ni à celle du centre des masses. Sa distance PA à l'étoile principale est :

$$PA = \frac{I_B}{I_A + I_B} \cdot AB \quad (5, III)$$

I_A et I_B étant la luminosité des composantes A et B, AB leur distance (fig. 12-III).

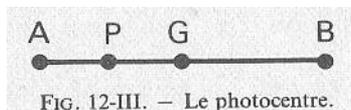


FIG. 12-III. — Le photocentre.

A et B sont les centres des images non séparées des composantes.
P est la position du maximum de densité photographique.

Le photocentre décrit une orbite homothétique de celles de A et B autour du centre de gravité. Un certain nombre d'étoiles doubles ont un compagnon invisible, mais décelable photographiquement grâce au mouvement du photocentre, on les appelle les binaires astrométriques. La formule (5, III) n'est pas rigoureuse, car on connaît mal la formation photographique d'une double source lumineuse à images confondues. Pourtant, une bonne connaissance des masses stellaires passe par la solution de ce problème. Des auteurs, comme P. J. Morel (1969) ont contribué récemment à sa solution. Le grand spécialiste des compagnons invisibles est P. van de Kamp aux Etats-Unis. Cet astronome en a découvert près d'une dizaine dont certains sont probablement de grosses planètes, un peu plus massives que Jupiter.

Toutefois il existe une catégorie de nombreux couples suffisamment écartés pour être bien observables par la photographie, qui a l'avantage d'être plus sensible que l'oeil et de fournir un document indiscutable.

Vu la petitesse de la distance des composantes, on peut remplacer la plaque par un film et prendre un grand nombre de clichés. On détermine le mouvement diurne par la photographie de traînées d'étoiles. Les poses doivent être courtes pour éviter l'étalement de la lumière sur le film ou la plaque, quelques secondes à une minute (voir fig. 13-III hors texte).

Un artifice utilisé par E. Hertzsprung, puis par K. Aa. Strand, consiste à placer une grille à gros fils parallèles devant l'objectif. Le réseau de fils donne de petits spectres de part et d'autre de l'image centrale. Si a est la distance entre le milieu de deux fils consécutifs, les spectres du premier ordre sont à une distance angulaire :

$$d = \gamma/a \quad (6, III)$$

de l'image centrale. Ces petits spectres sont quasi ponctuels, surtout si on utilise une lunette munie d'un filtre jaune. Avec un espacement d'un centimètre entre les fils, les images du premier ordre sont à $11",5$ de l'image centrale. En remplaçant les fils par des barreaux de plus en plus larges par rapport au vide qui les sépare, on augmente l'éclat des spectres au détriment de l'image centrale. La position des images du premier ordre permet de déterminer celle de l'image centrale avec une grande exactitude. Ce dispositif est très utile dans le cas de composantes à grande différence d'éclat. L'orientation du réseau permet d'avoir un bon repérage du mouvement diurne et l'espacement des fils une bonne valeur de l'échelle des distances. M. Duruy utilise avec succès les réseaux dans son observatoire du Rouret (A. Mmes) pour mesurer des étoiles doubles avec un télescope de 60 cm.

Chambre optique à électrons

La chambre électronique est basée sur le principe de la photoélectricité. Un grain de lumière, ou photon, est susceptible d'arracher des électrons libres au métal qui l'absorbe. Ainsi les photons se transforment en électrons. Ces derniers peuvent se multiplier en traversant des cellules à étages. Les faisceaux d'électrons sont traités par une optique électronique et forment une image de l'objet sur une plaque photographique.

Ce procédé permet des poses vingt-cinq fois plus courtes que la photographie ordinaire, il est utilisé au Pic du Midi par P. Laques pour mesurer des étoiles doubles. On saisit l'image en instantanée, on évite ainsi, dans une certaine mesure, l'étalement dû à l'agitation de l'atmosphère. Enfin, la plaque électronique donne une réponse linéaire, contrairement à la photographie classique, ce qui rend possible de bonnes mesures photométriques.

Toutefois des difficultés subsistent pour contrôler la distorsion du champ. Des photographies de grilles étalons permettent d'en bien connaître les constantes, en particulier la distance focale équivalente.

La photographie électronique, appelée électronographie, a permis d'obtenir des images d'anneaux de diffraction, grâce à la petitesse du temps de pose, souvent inférieur à la durée caractéristique de l'agitation atmosphérique aléatoire. D'ailleurs cette agitation est « gelée » sur le cliché ; les images des deux composantes d'une étoile double présentent les mêmes déformations qui n'empêchent pas une mesure précise de leur position mutuelle.

L'INTERFÉROMÉTRIE MODERNE

Interféromètre automatique de W. C. Wickes

Le principe de l'interférométrie de Fizeau-Michelson a été repris récemment par W. C. Wickes (1973), puis par A. Labeyrie (1973).

Wickes imagine un interféromètre à trous de Young. Il isole l'image de l'étoile au foyer du télescope, puis fait traverser un prisme tournant à réflexion totale par le faisceau rendu parallèle. Le faisceau est mis en rotation autour de son axe par le prisme et traverse un écran percé de deux fentes. Les franges tournantes qui en résultent tombent sur un écran à bandes radiales alternativement opaques et transparentes qui analysent l'image en la transmettant à un système photoélectronique.

En définitive, l'oeil est remplacé par un système plus sensible et rapide. En fait les performances ne dépassent pas beaucoup le pouvoir séparateur, mais sont supérieures à celles de l'oeil en magnitude. De plus l'information est enregistrée et exploitable au moment voulu.

Interféromètre à comptage de photons de A. Labeyrie

A. Labeyrie et ses collaborateurs (1970) atteignent le fond du problème en exploitant l'ensemble de l'image à pleine ouverture.

Ils étudient d'abord la formation de l'image d'une étoile, perturbée par l'atmosphère, au foyer d'un grand télescope. La cinématographie permet une étude détaillée de la structure complexe de cette image, qui se présente sous la forme d'une grappe de raisins, dont chaque grain est animé d'une vive agitation et est d'une durée de vie très courte.

Ils partent de l'idée que cette image résulte d'effets d'interférences entre le faisceau incident et les fluctuations spatiales aléatoires de phases. Un grain n'est autre que la transformée de Fourier de la pupille du télescope, c'est l'image de diffraction de l'étoile. Dans le cas d'une binaire, chaque grain contient l'information, l'ensemble de la grappe est double, mais le décalage est très petit, plus petit que la dimension de la figure de diffraction. Des franges d'interférences apparaissent si on observe la diffusion d'un faisceau de lumière cohérente par un cliché d'une grappe, image d'une étoile double. On montre que la séparation vaut :

$$\rho = \lambda 0 \cdot f' / s \cdot f \quad (7, \text{III})$$

$\lambda 0$ étant la longueur d'onde du faisceau cohérent, s l'interfrange, f' et f les longueurs focales équivalentes du télescope et du dispositif de transformée de Fourier.

La technique est utilisée par ses auteurs au télescope de 5 m du Mont Palomar. Ils prennent un grand nombre de photographies de l'étoile à étudier, plus d'une centaine, avec des poses d'un dixième à un millième de seconde. La distance focale équivalente est de 889 mètres, donnant une échelle de 2",5 par cm. Chaque photo est traitée en lumière cohérente, on obtient des franges identiques (fig. 14-III), mais peu contrastées; la somme de toutes ces photographies sur un cliché unique augmente le contraste. Les mêmes opérations sont faites avec une étoile simple de référence, ayant même éclat et même distance au zénith. Chaque point du profil d'intensité de l'image composite de l'étoile double est comparé au profil similaire de l'étoile de référence. Il en résulte une courbe de visibilité des franges analogues à celle de la théorie de Fizeau-Michelson. Des procédés de traitement par autocorrélation permettent de reconstituer l'image d'un couple, avec le rapport des éclats.

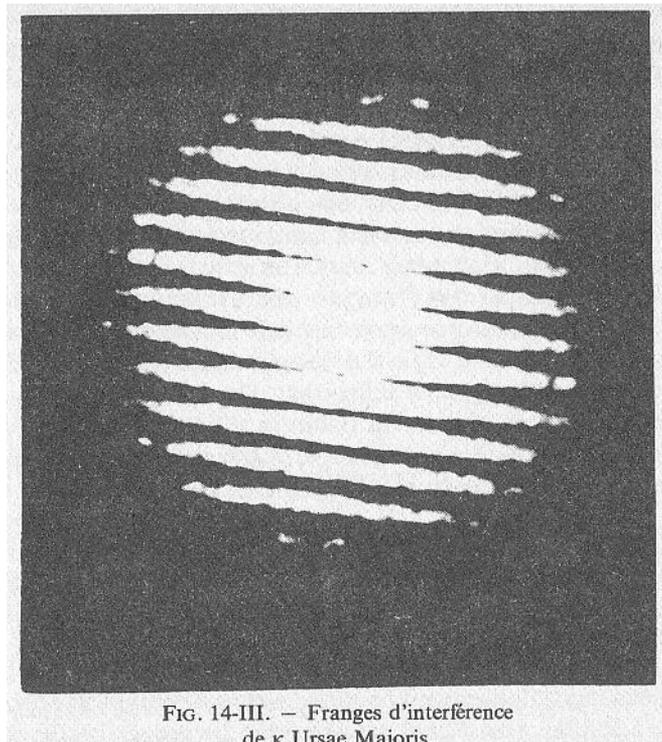


FIG. 14-III. — Franges d'interférence
de κ Ursae Majoris.

Les franges sont obtenues par la composition de cinquante clichés au télescope de 4 mètres de Kitt Peak National Observatory. La séparation est de 0",272.

(Cliché : H. M. Mc Alister Sky and Telescope avec l'autorisation de l'auteur et de l'éditeur.)

Un tel processus est long, mais il revient à extraire les mêmes informations que si on avait des images parfaites. Il a permis d'atteindre le pouvoir séparateur du télescope de 5 m ($0",02$) et des différences d'éclat de cinq magnitudes (1972).

A. Labeyrie et ses collaborateurs ont mis en évidence les compagnons de plusieurs binaires spectroscopiques et astrométriques comme : τ Persée, γ Persée, δ Scorpion, α Dragon et des étoiles doubles nouvelles comme β Céphée (fig. 15-III).

Réussir à observer des étoiles doubles avec le plein pouvoir séparateur des grands télescopes est donc devenu réalité. Les comités de programmes des grands télescopes ont compris l'importance de ces recherches ; les astronomes américains ont décidé d'y utiliser régulièrement un des monstres d'outre-Atlantique, le télescope Mayall de quatre mètres d'ouverture de Kitt Peak National Observatory. Là-bas Lynds et McAlister observent régulièrement, par ce procédé, des étoiles doubles de toutes classes et ont perfectionné dans les détails la technique de Labeyrie. Nombre de couples spectroscopiques sont dédoublés comme 12 Persée, η Orion, η et θ Vierge.

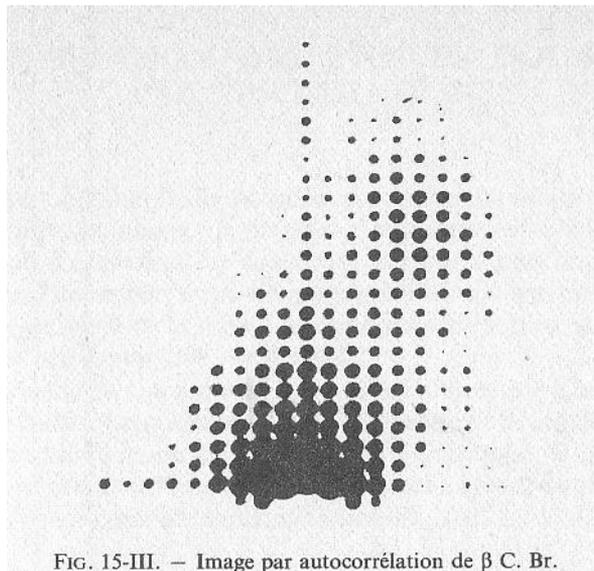


FIG. 15-III. — Image par autocorrélation de β C. Br.

Le nord est en bas.

Le compagnon est visible dans l'angle de position 150° ,
il est à $0",30$ de la principale

(Cliché Labeyrie. Observatoire du Mont Palomar.)

On peut augmenter les performances en utilisant deux télescopes séparés par une distance de plusieurs dizaines de mètres, ou un groupe de télescopes en polygone régulier, qui agissent, au sens de la résolution, comme un instrument unique de dimension équivalente à celle du groupe. Une installation de deux télescopes couplés, séparés par une dizaine de mètres, est en voie d'achèvement au centre d'Études et de Recherches Géodynamiques et Astrométriques près de Grasse.

Interféromètre à intensité de R. H. Brown

R. H. Brown, J. Davis et L. R. Allen, par une technique légèrement différente, obtiennent des résultats non moins spectaculaires à Narrabri Observatory en Australie (1971). Ils utilisent deux miroirs mobiles sur un chemin de fer circulaire et canalisent les flux lumineux transformés en énergie électrique vers un corrélateur central. Malheureusement la technique est limitée aux étoiles très lumineuses. Cet appareil a permis de résoudre α Vierge, et de préciser sa distance au soleil (84 parsecs).

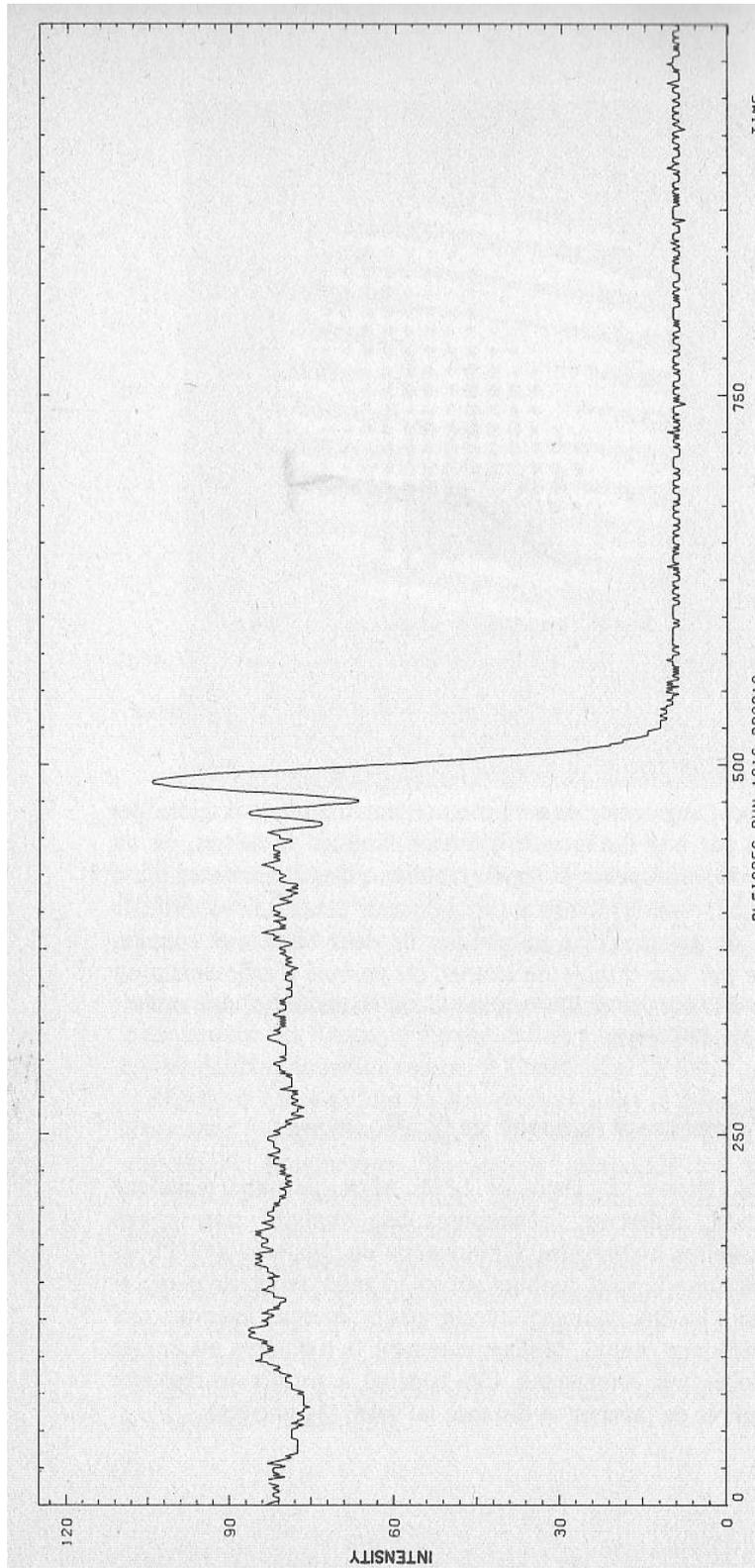


FIG. 16-III. — Profil d'occultation d'Alcyone, le 11 sept. 1973. Le profil est celui d'une étoile simple. (Cliché D. S. Evans. The University of Texas.) En abscisse, on lit le temps en millisecondes, en ordonnée l'échelle de l'intensité est arbitraire.

OBSERVATION DES ÉTOILES DOUBLES PAR OCCULTATIONS

On sait qu'une étoile occultée par le bord lunaire disparaît subitement en raison de l'extrême petitesse de son diamètre apparent. En général les deux composantes d'une binaire sont occultées l'une après l'autre selon leur séparation et leur position par rapport au bord de la lune. Le phénomène n'est plus instantané, quoique peu exploitable visuellement.

La rapidité de réponse des photomètres photoélectriques actuels est telle qu'il est possible maintenant de suivre en détails les phases d'une occultation, surtout celles qui sont rasantes. Si une étoile double est occultée, l'analyseur montrera deux figures de diffraction, plus ou moins confondues, mais discernables (fig. 16, 17-III). On en déduit les éclats et la séparation projetée sur le diamètre lunaire. Si l'occultation est observée en deux endroits différents, on a la séparation et l'angle de position, on atteint le millième de seconde de degré.

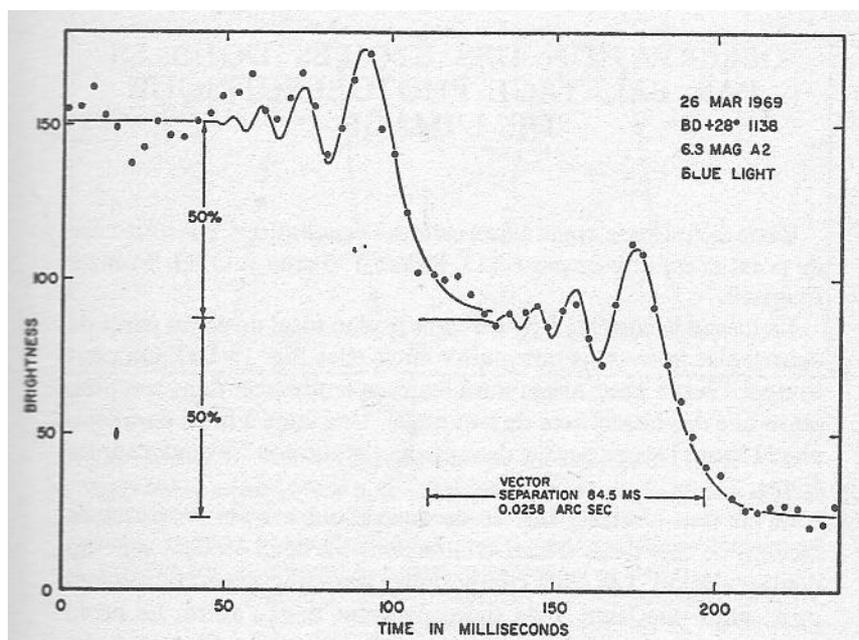


FIG. 17-III. — Profil d'occultation lunaire de l'étoile: BD + 28° 1138 (6,3).

On remarque un double système de franges. Les deux composantes sont séparées par 0",0258, ou 84,5 millisecondes de temps. Les magnitudes sont : 6,7 et 7,5.

(Cliché R. E. Nather et D. S. Evans, Astrophysics and Space Science.)

Il y a donc intérêt à observer les occultations dans un grand nombre d'observatoires dispersés. Une association a été créée dans ce but et édite un journal Occultation Newsletter. D. Evans, D. Dunham, J. Africano et d'autres, à l'observatoire McDonald aux Etats-Unis, ont trouvé des dizaines d'étoiles doubles très serrées. Une des plus remarquables est Atlas, dans les Pléiades, qui possède un compagnon de magnitude 5 à 0",004. Bien entendu, les occultations, comme l'interférométrie, permettent aussi de mesurer des diamètres apparents d'étoiles, ceux des satellites du système solaire et de petites planètes.

OBSERVATION DES ÉTOILES DOUBLES PAR BALAYAGE PHOTOÉLECTRIQUE DE L'IMAGE

Cette technique s'apparente à celle des occultations, elle a été mise au point et est utilisée par K. D. Rakos à Vienne et O. G. Franz à Flagstaff.

La méthode consiste à placer dans le plan focal un écran percé de deux fentes fines perpendiculaires entre elles (fig. 18-III). On peut tourner l'écran pour orienter les fentes et le déplacer dans son plan selon une des bissectrices de leur angle. Une lame à faces parallèles placée avant l'écran permet de regarder l'étoile pour la guider sur les fentes.

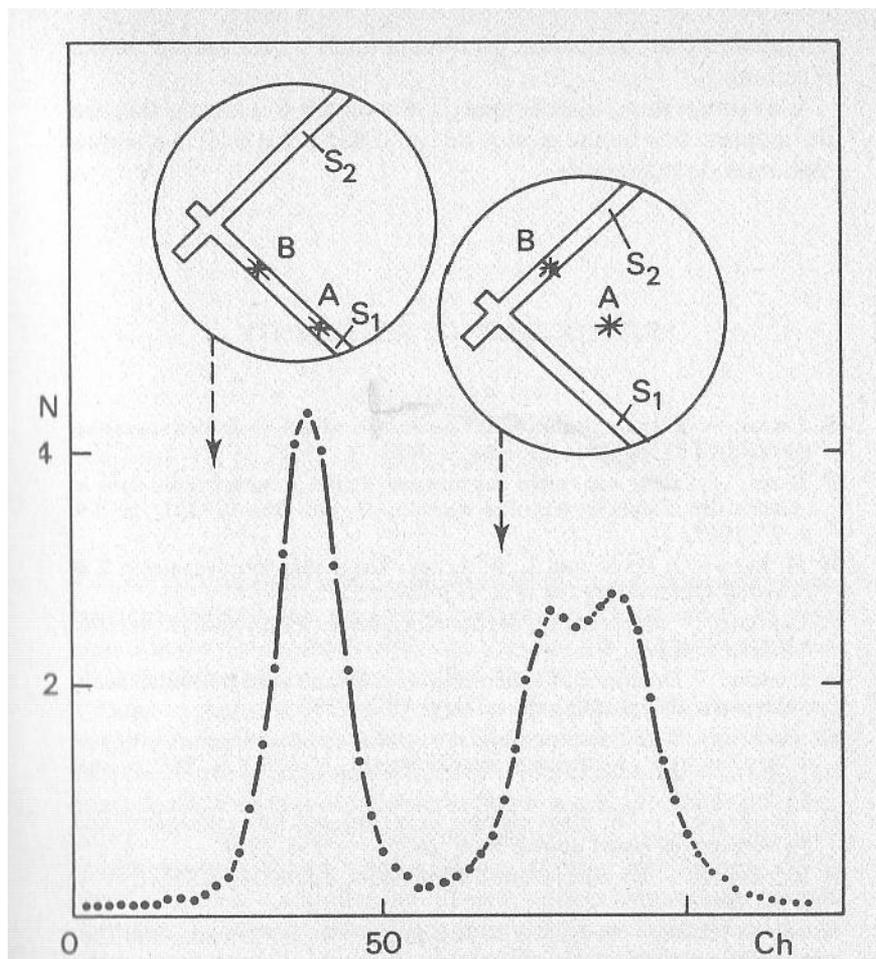


FIG. 18-III. — Profil d'intensité obtenu par balayage de l'image.

Deux fentes perpendiculaires S1 et S2 sont percées dans un écran obstruant le plan focal. Les deux images des composantes passent en même temps dans une fente : intensité maximum, ou bien l'une après l'autre. Le profil de l'intensité lumineuse et l'orientation des fentes permet de trouver les paramètres de mesure. (Figure extraite de « Proceedings of the astrometric conference », inauguration du télescope de 1 m de Turin, mai 1974, K. D. Rakos.)

Si on veut observer une étoile double, on oriente les fentes de façon à ce que l'une d'elles contiennent les deux étoiles; puis on déplace l'écran. Les deux composantes passent d'abord simultanément dans une fente, puis successivement dans l'autre. Le profil lumineux est enregistré sous la forme d'une courbe d'intensité. Le profil correspondant à la première fente est celui d'une étoile simple et sert de comparaison. Il s'agit de retrouver, à partir de l'enregistrement, le profil des deux composantes avec leur intensité relative. On peut opérer par transformée de Fourier, ou par le calcul des paramètres des deux fonctions dont la somme représente au mieux le profil de l'étoile double. L'orientation des fentes fournit déjà une valeur approchée de l'angle de position. Si les composantes sont trop rapprochées pour être séparées, on effectue plusieurs enregistrements ; le résultat est obtenu après un traitement un peu plus long.

L'avantage de cette technique est d'avoir à la fois les coordonnées du couple et une bonne mesure de leur différence d'éclat, à quelques millièmes de magnitude.

BIBLIOGRAPHIE RESTREINTE

- S. AREND. — Réglage pratique de l'équatorial visuel et de l'astrographe. Obs. Royal de Belgique. Monog. 2, 1951.
- P. BAIZE. — Valeur comparée des mesures filaires et non-filaires dans la mesure des distances d'étoiles doubles. J. des Obs. XXXII, n° 8-9, p. 97, 1949.
- R. H. BROWN, J. DAVIS and L. R. ALLEN. The Stellar interferometer, I at Narrabri Observatory. M.N.R.A.S. 137, p. 375, 1967.
- H. CAMICHEL. — Mesures d'étoiles doubles faites au Pic du Midi. J. des Obs. XXXII, N° 8-9, p. 94. 1949.
- A. DANJON. — Description et théorie d'un micromètre interférentiel demi-onde. Ann. Obs. Strasbourg, t. III, p. 181, 1937.
- D. H. EVANS, R. H. BROWN, J. DAVIS and L. R. ALLEN. — A study of α Virginis with an intensity interferometer. M.N.R.A.S. 151, p. 161, 1971.
- O. G. FRANZ. — A Photoelectric Area scanner for astrometry and photometry of visual double stars. L.O.B, n° 154, 1970.
- R. JONCKHEERE. — Un micromètre à fils obliques. J. des Obs. XXXIII, n° 4, p. 57, 1950.
- P. van de KAMP. — Principles of Astrometry. W. H. Freeman and Cie, London, 1967.
- A. LABEYRIE. — Observations interférométriques au Mont Palomar. Now. Revue d'Optique, t. VI, n°1, p. 15, 1975.
- H. A. MCALISTER. — Speckle interferometric measurements of binary stars. Astrophys. J. 215, p. 159, 1977.
- P. J. MOREL. — Contribution à la détermination photographique du rapport des masses d'une binaire visuelle. Thèse de spécialité, Obs. de Nice, 1969.
- P. MULLER. — Sur un micromètre à double image, ses possibilités et quelques questions connexes. B.A. t. XIV, fasc. 3, p. 13, 1947.
- K. D. RAKOS. — Photometric and astrometric observations of close visual binaries. Obs. Turin. Coll. inaug. du télescope astrométrique, 1974.
- W. C. WICKES and R. H. DICKE. — An automatic interferometer for double stars observations. A.J.78, p. 757, 1973

CHAPITRE IV

QUELQUES CONSEILS PRATIQUES

Nous avons passé en revue quelques méthodes d'observations, en insistant quelque peu sur le micromètre à fils avec lequel les plus grands noms des étoiles doubles ont travaillé. La plupart des grands observateurs n'en ont jamais utilisé d'autres.

Dans ce chapitre, nous décrirons en détails ce qu'un observateur visuel est amené à exécuter pour préparer et passer sa nuit sous la coupole. Nous exposerons le fruit de notre expérience de plus d'un quart de siècle en matière d'observation visuelle des étoiles doubles. Notre but est de guider le jeune astronome qui débute dans l'observation. Cela ne s'apprend pas comme les théories de la physique, mais s'acquiert au fil des années comme un métier d'artisan. Tout ce que fait l'astronome sous sa coupole porte sa signature, il travaille en vue de publier ses observations, elles seront jugées par ses pairs, quelquefois longtemps après. Il sait que toutes nos connaissances astronomiques, même les théories les plus abstraites ont pour base l'observation. Il sait aussi qu'une bonne mesure sera utilisée un jour et qu'une observation erronée sera toujours démasquée.

Préparation de la nuit d'observation

Les nuits d'observation seraient des séances tranquilles de mesures de laboratoire si l'atmosphère n'était pas là pour limiter fortement les performances en qualité et quantité qu'on attend d'une nuit. L'ensemble des perturbations créées par l'atmosphère porte le nom de turbulence. C'est le principal obstacle à l'observation, mais il est de taille.

La turbulence, que nous étudierons un peu plus en détails dans les pages suivantes, agit à deux niveaux : en altitude par suite de vents violents dans les parties hautes de l'atmosphère, et au sol par suite de courants de convection dus aux échanges d'air chaud et froid. L'astronome ne peut rien tenter pour diminuer la turbulence en altitude, mais il peut agir au niveau du sol, notamment en créant des courants d'air dans la coupole.

Il peut savoir d'avance, dans la journée, par l'observation de phénomènes naturels, si la nuit sera bonne. Une absence totale de vent est un bon signe. Si les feuilles restent fixes au bout des branches d'arbres, même les feuilles d'eucalyptus qui tremblent au moindre souffle, on peut espérer de bonnes images. Un excellent critère à Nice est donné par la mer : elle doit présenter de grandes surfaces plates comme de l'huile, allongées comme des rivières, un rivage dépourvu de liséré blanc, un horizon peu visible. Le ciel ne doit pas être trop bleu au zénith. Si l'odeur de la végétation reste près du sol, si les fumées domestiques ont peine à s'élever et même retombent vers le sol, il y a probabilité de bonnes images. Naturellement, on peut observer à la lunette une étoile en plein jour pour se rendre compte de la qualité du ciel, bien que la turbulence de jour diffère de celle de nuit.

On sait qu'en principe les planètes ne scintillent pas. Mais par mauvaises images, Vénus, Jupiter, Mars et Saturne présentent quand même une très légère scintillation, bien sensible pour un myope qui les regarde en ôtant ses lunettes. Une absence totale de scintillation dans ces conditions est un signe certain de bonnes images.

Il convient d'ouvrir la trappe de la coupole une heure avant le début de la séance et de mettre l'instrument en position presque verticale, obturateur ouvert. Les longues lunettes sont comme des montgolfières, elles emprisonnent de l'air chaud qui monte et reste derrière l'objectif. Cet air se refroidit par le tube et par l'objectif en tourbillonnant lentement. Cet effet est très marqué dans la grande lunette de Nice de dix-huit mètres de long. C'est une des raisons pour lesquelles il faut tenir horizontaux les tubes de lunettes pendant la journée. De même il faut éviter que les trappes et cimiers des coupoles reçoivent la chaleur du soleil couchant. On fera bien d'aérer la salle avant d'observer afin que tout l'air chaud soit évacué. Éviter d'introduire beaucoup de monde sous une coupole avant d'observer, la chaleur animale ne donne pas une ambiance favorable aux bonnes images.

Danjon conseillait d'arroser les coupoles afin de les refroidir ; ce n'est pas toujours possible. Du gazon abondant et bien mouillé autour des coupoles et des bouquetaux d'arbustes sont des modérateurs d'échange thermique. Il faut éviter les aires de stationnement de voitures sous la trappe d'observation, les voitures automobiles étant des sources chaudes.

D'une manière générale, la végétation naturelle du site doit être protégée. Un déboisement et des bâtiments nombreux favorisent la création de courants d'air chaud ascendants en début de nuit. Les sommets et les hauts plateaux donnent une qualité d'image supérieure à celle des versants. Les observations d'étoiles doubles exigent une atmosphère calme ; une brume légère n'est pas gênante. Les vents violents, qui purifient l'air et donnent au ciel un bleu profond, sont des sources de grande turbulence.

Précautions à prendre vis-à-vis de la lunette

A l'intérieur de la coupole, se trouvent un certain nombre d'appareils essentiels à de bonnes observations dont la qualité dépend du soin qu'on en prend. En premier lieu il faut un objectif propre, sinon la lumière des étoiles est absorbée et diffusée. Il ne faut donc pas hésiter à nettoyer à l'alcool la face de l'objectif tournée vers le ciel (crown) et même la face intérieure au tube (flint), si on y a accès. Un chiffon très propre, de toile fine usée, convient parfaitement ; il faut frotter jusqu'à disparition complète des ressuies, au besoin en appliquant plusieurs fois de l'alcool. La suie des huiles lourdes est une grande ennemie des verres, car elle adhère et peut pénétrer les vieux flints. Il faut visiter son objectif au moins tous les deux mois. Les mêmes précautions de propreté sont à prendre pour les oculaires ; mais ils sont souvent traités pour éviter les reflets, on ne peut donc pas les essuyer, mais les passer doucement au pinceau de soie.

L'intérieur du tube de la lunette ne doit ni réfléchir ni diffuser de lumière vers l'oculaire. Il faut vérifier le bon état intérieur du tube en l'éclairant avec le bleu du ciel. Autrefois l'intérieur des lunettes étaient garni de longs tuyaux cannelés, laissant un intervalle entre eux et le tube, afin d'arrêter toute lumière diffusée par les lampes placées au milieu de la lunette ou près de l'objectif. Il convient de supprimer ces tuyaux qui alourdissent l'instrument, ne laisser que deux diaphragmes et éviter si possible les sources lumineuses à l'intérieur de l'instrument.

Beaucoup d'instruments utilisés pour mesurer des étoiles doubles sont encore des lunettes assez anciennes à monture allemande, conçues pour permettre l'observation de tous les points du ciel. Ces instruments, dont les parties principales sont en porte-à-faux, doivent être parfaitement équilibrés, sous peine d'accidents graves.

L'équilibrage se fait en deux temps. On vérifie d'abord que le centre de gravité du tube se trouve à hauteur de l'axe de déclinaison. Cela demande une judicieuse répartition des contrepoids (fig. 1-IV) ; la vérification se fait au dynamomètre à ressort, dans plusieurs positions de l'instrument. On vérifie ensuite que le centre de gravité de l'ensemble mobile se trouve à l'intersection des axes horaire et de déclinaison. Comme exemple, indiquons que le poids des parties mobiles de la grande lunette de Nice est de sept tonnes ; l'équilibrage est réalisé à deux ou trois kilogrammes près, des systèmes pneumatiques bloquent l'instrument en permanence et assurent une sécurité totale. Les vieux instruments comportent en outre des contrepoids destinés à soulager les galets de roulement. Il convient de rééquilibrer l'instrument par une tare, à chaque fois qu'on ôte un appareil auxiliaire. L'oubli de cette règle élémentaire est à l'origine de catastrophes qui ont coûté des vies humaines.

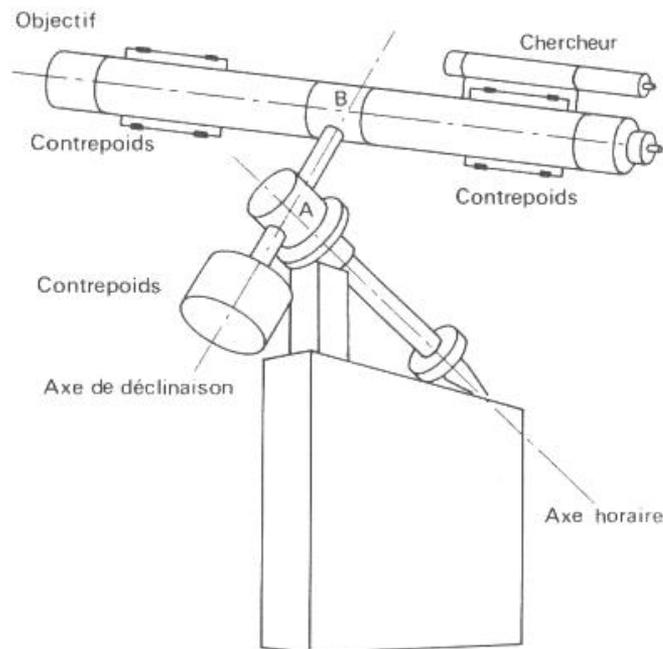


FIG. 1-IV. — Équilibrage d'une lunette astronomique.

A Centre de gravité des pièces mobiles.

B Centre de gravité de la lunette.

Les montures de la fin du siècle dernier sont souvent munies de cercles divisés en argent, gradués de minute en minute de déclinaison et de vingt secondes en vingt secondes de temps. Ces cercles seront nettoyés aussi fréquemment que l'objectif, il ne faut pas y déposer de vernis. Ils seront lus de préférence à l'aide d'un index en fil de nylon, éviter les pointeaux qui laissent une ombre gênante. L'accès optique à ces cercles se fait à l'aide de petites lunettes astronomiques et de prismes à réflexion totale. On conservera ces dispositifs anciens, en modifiant seulement l'éclairage ; ils permettent le pointage des astres à une fraction de minute de déclinaison et à quelques secondes en ascension droite, ce qui est indispensable. En effet, l'observateur d'étoiles doubles dispose d'un champ stellaire de cinq à six minutes d'arc, les faibles étoiles sont invisibles dans le chercheur, il ne peut compter que sur son instrument pour les identifier. Même s'il existe des systèmes électroniques de repérage, l'observateur fera bien de conserver les cercles anciens qui ont l'avantage d'une fidélité à toute épreuve.

La turbulence atmosphérique

Avant d'aborder les problèmes pratiques de l'observation, il convient d'étudier la principale cause de destruction de l'image : la turbulence atmosphérique.

Les rayons lumineux subissent six perturbations principales de la part de l'atmosphère. Elle réfracte, absorbe, diffuse, disperse, agite et étale la lumière. Toutes ces causes contribuent à détériorer les images et à les rendre souvent méconnaissables et inutilisables. La réfraction, l'absorption et la diffusion jouent un rôle, en général, moins important dans l'observation à haute résolution. La dispersion n'est autre que la réfraction différentielle, elle montre les étoiles sous la forme d'un petit spectre. En réalité ce phénomène n'est sensible que loin du zénith, il est atténué dans les lunettes. On peut le réduire en interposant un écran jaune. Par contre l'agitation et l'étalement sont responsables, dans la plupart des cas, de la dégradation des images. L'agitation est due au passage devant l'objectif de nappes d'ondes planes, à inclinaisons aléatoires dues aux variations lentes d'indice de l'atmosphère. L'étalement est produit par une nappe d'onde déformée, qu'on ne peut plus considérer comme plane. Dans les grandes ouvertures, on ne voit plus d'agitation, car l'onde déformée par les rapides variations d'indice de l'air n'est jamais plane sur l'ensemble de l'objectif. Dans une petite ouverture, certaines nuits, on verra des images bien formées, mais agitées autour d'une position moyenne, alors que dans un grand instrument elles paraîtront plus stables mais étalées (fig. 2-IV).

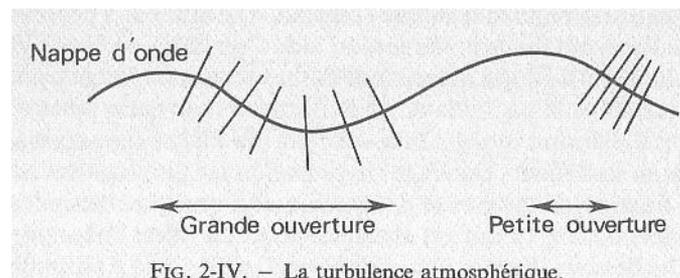


FIG. 2-IV. — La turbulence atmosphérique.

La nappe d'onde arrivant sur un petit objectif peut être considérée comme plane, mais non celle qui arrive sur une grande ouverture. Dans le premier cas, les images sont agitées, mais nettes, elles sont floues, mais stables, dans le second cas.

C'est l'ensemble de l'agitation et de l'étalement qu'on appelle turbulence. Mathématiquement on la définit comme étant l'écart angulaire moyen entre le rayon lumineux et sa direction théorique. Cet écart varie d'une façon aléatoire à l'intérieur d'un petit cône d'angle au sommet tout petit, au plus quelques secondes d'arc. A. Danjon a défini une échelle de turbulence donnant l'ordre de grandeur de cet angle en fonction de l'aspect de l'image. Lorsque la turbulence atteint en valeur angulaire celle du pouvoir séparateur, l'image de diffraction est fortement altérée, son aspect tend à disparaître, les anneaux étant évanouissants. Lorsque la turbulence est nettement inférieure au pouvoir séparateur, par exemple voisine de la moitié, la tache de diffraction reste bien visible, l'instrument peut donner son plein rendement. Par exemple un instrument de 50 cm, dont le pouvoir séparateur est de $0",24$, ne supportera pas une turbulence supérieure à $0",12$ sans montrer une altération notable des images. Comme la turbulence est rarement inférieure à $0",1$ on constate que les grandes ouvertures sont très peu utilisées à plein rendement.

Noter l'état des images au début des observations et pendant leur déroulement est important. D'une façon générale, si on désire faire des observations utiles, les anneaux de diffraction et la tache centrale doivent être visibles. On ne peut observer correctement dès que la turbulence élargit la tache au point de la rendre méconnaissable. Une vive agitation d'une image assez pure est bien préférable à un étalement, car l'oeil et le cerveau filtrent le phénomène et retiennent l'information, pourvu qu'elle apparaisse de

temps en temps pendant l'observation. Plusieurs observateurs ont pris l'habitude de noter la qualité des images dans une échelle de 0 à 5, allant des images très étalées aux pures figures de diffraction. D'ailleurs la qualité varie d'une minute à l'autre, même au cours d'une très bonne nuit. C'est au coucher du soleil, au moment où le régime des vents évolue vers la brise de nuit que l'on trouve les meilleures images.

L'observation des ombres volantes donne de précieux renseignements sur l'orientation des vents, leurs vitesses et sur les tourbillons thermiques à l'intérieur de l'instrument. Pour cela on pointe une étoile brillante et on met l'oeil au voisinage du plan focal, oculaire ôté. On voit l'objectif illuminé et parcouru rapidement par des stries ou ombres fugitives qui ressemblent un peu à celles qu'on voit au fond d'une piscine dont la surface est agitée. Ces vagues sont causées par des nappes d'air d'indice variable (fig. 3-IV en hors texte). En mettant l'oculaire et en tirant de quelques millimètres, on voit l'image de l'étoile en lumière extrafocale; la mise au point se fait sur un plan situé à quelques kilomètres, l'aspect ressemble à celui d'un drapeau flottant au vent. Par ce procédé, on se rend compte de l'altitude des vents. S'ils sont à très haute altitude, on a peu d'espoir d'amélioration en cours de nuit.

Il faut distinguer la turbulence d'origine instrumentale et d'origine atmosphérique. L'une donne des remous à basses fréquences sur lesquels on peut agir en ouvrant les fenêtres, l'autre donne un étalement constant d'autant plus important que l'origine de la perturbation est éloignée.

Dès que l'aspect de l'image s'écarte de celui de la figure d'Airy on éprouve des difficultés à mesurer; la bissection par le fil du micromètre se juge mal, les parallélismes aussi. Les micromètres à double image et les interféromètres sont moins sensibles à ces dégradations. Les nuits parfaites sont très rares, l'astronome est constamment gêné par la turbulence dont tous les effets s'accroissent, en particulier l'agitation et l'étalement. Il en résulte que la qualité des nuits est rarement favorable à l'observation des étoiles doubles. L'astronome doit être à l'affût des heures propices. Les heures de présence sous la coupole sont bien souvent des heures d'attente. L'astronome qui veut profiter coûte que coûte de conditions médiocres risque de faire des observations inutilisables et, dans le cas de recherche de couples nouveaux, de ne pas découvrir les binaires les plus difficiles donc les plus intéressantes.

Pratique de l'observation visuelle des étoiles doubles

La première chose à faire en arrivant sous la coupole pour observer est de vérifier l'indication de l'horloge astronomique. Actuellement l'heure sidérale est donnée par des compteurs électroniques, dont on se méfiera car ils sont fragiles, tombent en panne et indiquent parfois une heure fantaisiste. On conservera soigneusement les vieilles pendules à balancier qui ne se détraquent jamais, même après les orages les plus violents.

Il est astucieux de faire marquer à la pendule à balancier une heure légèrement différente de l'heure sidérale, selon la date d'équinoxe choisie pour ses coordonnées d'étoiles. Par exemple, si les coordonnées sont données pour 1950, on mettra la pendule à l'heure d'après l'équinoxe 1950 et la correction de pendule sera quasi nulle au cours de la nuit.

Toute lumière doit être éteinte sous la coupole pendant l'observation. On rappelle que l'oeil doit rester quarante minutes dans l'obscurité avant d'avoir toutes ses possibilités. Les étoiles à observer seront transcrites sur une liste ou un cahier qu'on éclairera en cas de besoin par une petite veilleuse au néon. Les lampes de poche ordinaires éclairent beaucoup trop, leur usage devrait être interdit dans un observatoire. L'astronome qui se déplace la nuit à pied pour son travail doit se contenter de la lumière qui tombe des cieux. C'est un bon moyen d'accoutumer son oeil au travail qui l'attend.

L'observation des étoiles n'est pas dangereuse pour l'oeil. Mais il convient de prendre des précautions pour les astres lumineux. En effet l'énergie lumineuse captée par l'objectif passe en entier dans le cercle oculaire, qui est d'autant plus petit que le grossissement est plus élevé. Il en résulte que la cornée reçoit sur une petite partie de sa surface le flux de lumière pénétrant dans l'objectif. Ce flux vaut $C \cdot (G/G_e)^2$ fois celui reçu par l'oeil nu. C'est par cette quantité qu'est multiplié l'éclairement reçu en un point de la cornée, elle peut atteindre cinq millions dans les grands instruments. Ce flux n'atteint pas en entier la rétine et, de plus, le restant se répartit sur toute sa surface. En regardant la lune ou une planète, on aura donc l'impression de n'être pas ébloui, alors que la cornée subit une agression lumineuse qui, à la longue, peut fatiguer l'oeil. Enfin le très mince pinceau qui pénètre l'oeil est sensible aux défauts du milieu oculaire, mais cela ne gêne pas un observateur habitué.

L'observation des étoiles doubles exige un entraînement long et fastidieux. C'est le principal obstacle au recrutement des jeunes. La différence fondamentale entre l'observation photographique et visuelle est que dans le premier cas c'est l'instrument qui travaille, mais dans le second cas c'est l'astronome. Ce dernier se bonifie à l'usage, mais il lui faut huit ou neuf ans d'expérience avant d'être un observateur

confirmé et reconnu. Un changement d'objectif demande une année d'accoutumance. C'est le temps qu'a mis l'auteur à bien observer à la lunette de 50 cm de Nice, lorsqu'elle a remplacé celle de 38 cm ; il lui a fallu plus de temps avec la grande lunette de 76 cm. Chaque objectif a sa personnalité, aucun n'est identique à un autre. En effet le spectre secondaire, la distance focale, l'achromatisme, la trempe ne sont jamais les mêmes. La réaction à la turbulence atmosphérique due au site, à la structure de la coupole et à l'objectif n'est jamais la même non plus. Les premières observations dans une nouvelle lunette sont toujours décevantes, même si on est rompu à la routine, car l'oeil doit s'accoutumer aux conditions de chaque instrument. Ces raisons expliquent le petit nombre d'observateurs réguliers dont la persévérance est mise à l'épreuve. A. Danjon, parlant de l'observation des étoiles doubles, disait qu'il fallait avoir cela dans le sang.

Sans en exagérer l'importance, il faut quelques dispositions naturelles pour devenir bon observateur. On travaillera dans la détente physique, sans efforts, sans tonus musculaire. Il n'est pas nécessaire de fermer un oeil pendant l'observation, puisque l'organe inutilisé se trouve devant le boîtier du micromètre formant écran. La tête, rejetée en arrière, repose sur les épaules sans efforts, un cou long est désavantageux. On observera debout, les jambes arquées pour amener la tête à la bonne hauteur. La position assise est déconseillée car elle fait perdre du temps. Les chaises d'observation sophistiquées qu'on remarque parfois sous les coupoles sont à mettre au musée. Un bon observateur doit se sentir à l'aise dans toutes les positions, ce qui ne s'acquiert que très lentement. Les débutants éprouvent une réelle difficulté à ces exercices. L'aide d'un assistant est inutile si l'astronome sait bien s'organiser ; il dicte ses observations sur bandes magnétiques ou, comme à Washington et à Nice, les enregistre automatiquement. Il évitera ainsi les ennuis causés par un secrétaire qui s'endort sans avertissement.

Les observations au sud du zénith se feront tube à l'ouest du pilier, de façon à voir les astres avant leur passage au méridien, ce qui est préférable pour la qualité des images. Si on observe des circumpolaires, il convient de travailler tube à l'est, ainsi l'astronome et l'instrument retrouveront leur même position mutuelle. Les vieilles lunettes sont conçues pour observer tube à l'est et plusieurs astronomes ont gardé cette habitude, mais dans cette position les étoiles ne sont observables qu'après le méridien.

Pendant l'observation il faut agir vite, mais sans brusquerie. L'étoile doit rester immobile sinon des effets physiologiques la montrent déformée, elle doit être près du milieu du champ. L'oeil, toujours le même, doit scruter rapidement l'image, s'adapter à l'aspect des étoiles simples, à la façon dont s'agitent les aigrettes de lumière. Il ne faut pas hésiter dans les bissections ou les estimations de parallélisme qui se feront toujours avec la ligne des yeux parallèle ou perpendiculaire à la direction des composantes. On a avantage à faire cinq pointés en angle de position et quatre en double distance. Il y a toujours un grossissement optimum à utiliser en fonction des conditions souvent variables et des caractéristiques de l'objet observé. On est donc amené à changer d'oculaire très souvent, un peu comme un conducteur de voiture modifie ses rapports de boîte de vitesses en fonction de son itinéraire. On a même souvent avantage à mesurer l'angle de position et la séparation avec des grossissements différents. Pour bissecter, il faut bien voir la tache, ce qui exige un grossissement élevé ; tandis qu'un parallélisme entre les fils et la ligne des composantes se juge mieux avec des images plus fines. Une observation d'étoile double ne doit pas excéder cinq minutes. Compte tenu du temps de calage, un rythme de huit mesures à l'heure est excellent avec une lunette bien montée.

Plus l'ouverture augmente, plus elle devient sensible à la turbulence. L'expérience de l'auteur, avec des lunettes de 38 à 102 cm, a permis de faire quelques comparaisons. Si les images sont parfaites avec 38 cm, elles sont pratiquement parfaites avec 50 cm et très bonnes avec 76 cm. Nous avons remarqué que l'atmosphère limite le grossissement à une même valeur quelle que soit l'ouverture. Par exemple, si dans une lunette de 38 cm les conditions ne permettent pas de dépasser 900 fois, on ne pourra pas dépasser 900 fois avec une ouverture de 76 cm, mais on pourra aller jusque-là. Dans ces conditions la grande ouverture ne permettra pas d'observer des couples trop serrés pour la petite. Si les conditions sont plus médiocres, l'expérience montre que la perte d'efficacité devient très importante pour une grande ouverture. Les étoiles doubles à grande différence d'éclat n'y seront plus observables, alors qu'une ouverture plus petite les montrera encore.

Aux limites de l'instrument l'oeil éprouve des difficultés non seulement à mesurer, mais à juger. Par exemple, devant tel couple difficile, on sera incapable de se rendre compte si les composantes sont d'éclat égal et très serrées, ou bien d'éclat différent et plus écartées. Certains angles de position sont plus difficiles à mesurer que d'autres, ce sont ceux qui exigent une position plus pénible de la tête, vers 130 ou 310 degrés.

Les observations, dictées sur bandes magnétiques ou imprimées sur rouleaux, seront dépouillées dès le lendemain matin et transcrites sur un registre. On n'hésitera pas à décrire son observation et à l'orner de commentaires redondants qui marqueront le degré de difficulté de la mesure, ou l'étonnement devant

un spectacle inattendu.

Enfin nous terminerons ce paragraphe par un conseil à ceux qui s'apprêtent à rendre visite à un astronome sous sa coupole : ne pas oublier qu'un astronome, qui observe visuellement par images parfaites, est un fauve qui dévore sa proie, ne le déranger sous aucun prétexte, laisser la nature opérer.

Observation d'objets célestes artificiels

Au Palais de la Découverte, et dans certains laboratoires d'astronomie, on a construit des montages optiques qui reproduisent l'aspect de certaines étoiles doubles ou multiples, de planètes, de nébuleuses et d'amas d'étoiles. Ces montages sont observés dans les conditions les plus proches de la réalité, à travers de fausses lunettes et télescopes. On fabrique et anime des voûtes célestes reproduisant les mouvements apparents, ce sont les planétarium.

Ces montages permettent de montrer le ciel aux visiteurs à tout moment. Naturellement rien ne vaut l'examen réel d'un objet céleste, car on ne peut reproduire la turbulence de l'atmosphère, ni la variété innombrable des corps célestes avec leurs couleurs, mais on peut ainsi avoir une bonne illusion de l'observation, se familiariser avec la technique, essayer des mesures.

L'amateur qui dispose d'une lunette ou d'un petit télescope aura avantage à se fabriquer des étoiles doubles artificielles, pour se rendre compte des qualités de son instrument. Rien n'est plus facile que de faire une étoile artificielle, l'illusion est parfaite. Il suffit de regarder l'image d'une petite lampe, ou du Soleil, réfléchi par une bille d'acier poli située assez loin pour que le diamètre apparent de l'image soit négligeable. Avec un objectif de dix centimètres, on pourra prendre une bille de quatre millimètres, la mettre à une centaine de mètres et regarder en plein jour l'image réfléchi du Soleil, ou mieux, la nuit venue, celle d'une petite lampe de poche située à quelques décimètres en avant de la bille. On a ainsi une image stellaire stable, non turbulente, qu'on peut examiner à son aise, confortablement, sans se tordre le cou.

Deux lampes côte à côte donneront une belle étoile double par réflexion. On pourra faire varier à volonté l'écartement jusqu'à la limite de discernement et même créer des différences d'éclat en reculant une lampe par rapport à l'autre.

J'ai souvent utilisé ce procédé pour étudier la qualité de petites lunettes acquises par des amateurs. Si on note par R le rayon de la bille, L la distance entre les lampes, h leur distance à la bille et D celle de l'objectif à la bille, la séparation du couple artificiel s'écrit en secondes de degré :

$$s = \frac{R \cdot L}{h \cdot D} \cdot 10^5$$

Avec des billes de quatre millimètres, des lampes écartées l'une de l'autre de dix centimètres, mises à un mètre de la bille, elle-même observée à cent mètres, la séparation est de deux secondes de degré. Ce montage permet d'imiter nombre de couples connus et de faire profiter ses amis de séances d'observations même par temps couvert.

D'ailleurs, en ville ou à la campagne, les étoiles artificielles abondent en plein jour. Toute aspérité réfléchissant la lumière du Soleil est une étoile artificielle. Les isolateurs sur les poteaux électriques ou téléphoniques, les vitres, les tuiles en céramique, les particules de mica sur les murs de granit donnent des quantités d'images stellaires.

Les vieux moulins à vent ruinés qui jalonnent les horizons de nos campagnes constituent, eux, d'excellentes planètes artificielles. Si on a la chance d'avoir un horizon étendu, on ne manquera pas d'en repérer quelques-uns, à vingt ou trente kilomètres, dont les dimensions apparentes correspondent à celles des grosses planètes. A la lumière du Soleil, les murs circulaires de ces édifices présentent un terminateur, les taches et crevasses de ces ruines constituent d'excellents détails planétaires. L'avantage est de pouvoir se rendre sur place et de photographier l'objet dans les mêmes conditions d'éclairage que celles de l'observation. On compare les photos, ou les dessins, pris à travers la lunette, avec ce que l'on voit sur le site, simulant ainsi les sondes spatiales qui vont montrer sur place ce qu'on photographie avec nos télescopes terrestres. C'est un bon moyen de se familiariser avec une lunette ; j'en ai beaucoup usé au Puybelliard, en Vendée, où, de mon petit observatoire de vacances, je domine toute une partie du bocage. Les paysans intrigués me voyaient avec méfiance arriver sur les hauteurs, examiner leurs vieux moulins et m'intéresser particulièrement à telle tache ou aspérité qui simulaient bien une mer ou une haute montagne.

BIBLIOGRAPHIE RESTREINTE

- V. BAROCAS. — Atmospheric seeing. *J. Brno Astr. Ass. G. B.*, vol. LXXXII, n° 4, p. 279, 1972.
- P. COUTEAU. — L'Osservazione Astronomica ad alta risoluzione. *Publ. Istituto Nazionale Di Ottica IV*, n° 655, p. 883, 1972.
- V. I. KOZHEVNIKOV. — Conditions diurnes de visibilité à proximité de la surface terrestre. *Solnech Dannye Bjull. S.S.S.R.*, n°12, p. 104, 1971.
- F. MARTIN, J. BORGNINO, F. RODDIER. — Localisation des couches turbulentes atmosphériques par traitement optique de clichés d'ombres volantes. *Nouv. Revue d'Optique*, t.VI, n° 1, p. 15, 1975.
- J. VERMIN et F. RODDIER. — Détection au sol de la turbulence atmosphérique par intercorrélation spatio-angulaire de la scintillation stellaire. *C.R. Acad.* 1975.
- G. WESTHEIMER. — Image Quality in the human eye. *Optica Acta*, vol. XVII, n° 9, p. 641, 1970.
- Symposium N° 19 DE L'UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE. — Le Choix des sites d'Observatoires astronomiques. *B.A. t. XXIV*, fasc. 2. p. 85, 1963.
- Cl. RODDIER. — Étude des effets de la turbulence atmosphérique sur la formation des images astronomiques. Thèse, 1976, université de Nice.

CHAPITRE V

L'IDENTIFICATION DES ÉTOILES

Difficultés de l'identification des étoiles

Il est fondamental de bien repérer les objets qu'on observe, et de savoir les trouver dans les catalogues. Les coordonnées des étoiles doubles sont habituellement données à 1' près en déclinaison et 0,1 mn près en ascension droite. C'est généralement suffisant, l'observateur fait confiance aux coordonnées qui lui sont fournies dans son programme. Cela suppose que le découvreur a bien fait le travail d'identification. Parfois le couple recherché n'a pas été observé depuis des dizaines d'années, voire depuis sa découverte. Il n'est pas rare alors de ne pas trouver l'astre désiré. De plus des erreurs minimes sur les coordonnées peuvent entraîner une confusion d'étoiles et aboutir à un mélange inextricable d'observations inutilisables.

L'observateur d'étoiles doubles est trop souvent passif. Il devrait vérifier l'identification des étoiles chaque fois qu'il y a doute; c'est-à-dire lorsqu'il a des difficultés à trouver l'étoile à la place indiquée ou bien lorsqu'il voit plusieurs couples dans le champ de son instrument ou au voisinage.

Tout chercheur amené à fréquenter une coupole, et même amené à nommer des astres dans un mémoire, devrait avoir des notions de base sur les catalogues d'étoiles. Les étoiles les plus brillantes, environ trois mille, se trouvent mentionnées dans de nombreux catalogues, au moins sept principaux, dans lesquels elles ont des dénominations différentes, sans compter leur nom ou lettre de constellation. Plus de deux cent mille étoiles sont présentes dans cinq catalogues. Chacune a donc de multiples étiquettes qu'il ne faut pas confondre. Tout astronome doit pouvoir remonter des étiquettes aux coordonnées et réciproquement. Comme on le verra, le travail devient de plus en plus difficile à mesure qu'on descend l'échelle des éclats.

L'observateur d'étoiles doubles est le plus concerné par ces problèmes d'identification, car étant obligé de repérer son étoile avec de forts grossissements, il ne dispose que d'un champ petit, généralement occupé par l'étoile qu'il cherche toute seule perdue dans la nuit. Si l'aspect de l'étoile double est conforme à ce qu'il attend, il se contente de mesurer, mais si l'étoile est simple, ou est devenue méconnaissable par suite du mouvement orbital, il faut être sûr de la bonne identification de l'objet. Cela devient primordial lorsqu'on se livre à la recherche de couples nouveaux; il faut savoir d'avance quelle étoile on s'apprête à regarder et être assez sûr de soi pour corriger d'éventuelles erreurs de catalogue.

L'historique des catalogues est long, il n'est pas question de l'entreprendre ici. Chaque génération depuis Képler s'est ingéniée à mieux connaître la position des étoiles et a produit des catalogues de plus en plus abondants et précis. Ces travaux n'ont souvent qu'un intérêt historique.

On peut classer les catalogues en quatre groupes principaux : les catalogues fondamentaux, les catalogues intermédiaires, les catalogues généraux et les catalogues spéciaux.

Les catalogues fondamentaux

Leur but est de donner la position absolue d'un certain nombre d'étoiles, appelées étoiles fondamentales, judicieusement réparties sur la sphère céleste. Elles servent de repères pour connaître la position des plans fondamentaux : équateur et écliptique. A leur tour les plans fondamentaux servent à connaître la position des autres étoiles.

Le premier catalogue fondamental est celui d'Auwers (1879), publié par l'Association Astronomique allemande (Astronomische Gesellschaft ou AG en abrégé). Il est désigné par les initiales FC, et contient 539 étoiles boréales.

Le deuxième catalogue fondamental (NFK) et le troisième (FK3) ont été publiés par J. Peters en 1907 et A. Kopff en 1938. Le nombre d'étoiles passe à 1 535, incluant toutes celles d'Auwers.

Enfin en 1963, paraît le quatrième catalogue fondamental (FK4). C'est une révision du FK3 par W. Fricke et A. Kopff qui donne les positions au millième de seconde de temps et au centième de seconde de degré.

Les catalogues intermédiaires

Comme les catalogues fondamentaux, ils contiennent un certain nombre d'étoiles, mais en plus grande quantité. La précision sur la position est moindre, mais dans les catalogues les plus récents le nombre d'étoiles atteint près de trois cent mille.

Jusqu'en 1920, les catalogues intermédiaires ont été faits à l'aide d'observations méridiennes. Ce n'est qu'à partir de 1928 que les astrographes ont été systématiquement employés.

Les plus anciens catalogues qui contribuent au calcul de la position actuelle des étoiles sont ceux de Halley, Flamsteed, Lacaille et Bradley parus en 1679, 1691, 1763 et 1817. Beaucoup d'étoiles doubles du catalogue de Burnham sont identifiées par rapport à ces anciens recueils.

Une mention spéciale doit être faite au catalogue de J. de Lalande, encore en usage de nos jours, car il sert toujours de référence pour désigner quelques étoiles à forte parallaxe et à trajectoire non linéaire. Les observations de Lalande sont faites de 1789 à 1799 avec une petite lunette de sept centimètres d'ouverture à l'observatoire de l'Ecole militaire à Paris. La tourmente révolutionnaire n'empêche pas J. de Lalande d'observer en onze ans la position de 47 390 étoiles. Paradoxalement ce n'est pas un observatoire français, mais une fondation scientifique britannique, qui réduit et publie les observations de cet astronome en 1847. Dans cet ouvrage, on donne les positions pour l'équinoxe 1800 avec une précision de 0,01 s et 0",1. Le catalogue de Lalande est très en avance sur son époque à la fois par le nombre d'étoiles et la précision.

D'autres catalogues remarquables pour l'époque paraissent dans la première moitié du XIXe siècle, en particulier ceux de Piazzini et Bessel. Grâce à eux, le mouvement propre de nombreuses étoiles est déterminé dès la fin du siècle dernier. Mentionnons aussi l'important catalogue de Groombridge, paru en 1838, encore en usage de nos jours. C'est un catalogue de 4 243 étoiles circumpolaires fait à Londres dans un observatoire privé.

A partir de 1865, le besoin se fait sentir de connaître avec précision la position de centaines de milliers d'étoiles, afin notamment d'aider à la découverte des planètes et des comètes et de pouvoir déterminer aisément leurs trajectoires. L'Association Astronomique allemande, déjà citée, organise à travers l'Allemagne, la Russie, l'Angleterre, l'Amérique du Nord, la France, puis les Indes, l'Australie et l'Afrique du Sud, une chaîne de vingt observatoires avec pour mission d'observer des zones célestes de cinq degrés en moyenne. Il en est résulté vingt catalogues, parus les uns après les autres à partir de 1870. Ils constituent ce qu'on appelle en abrégé l'AGK1. On en trouvera la liste détaillée dans le Traité d'astronomie stellaire de Ch. André (1899). Les étoiles de l'AGK1 sont désignées par les initiales AG, suivies du nom de l'observatoire de la zone céleste correspondante et du numéro de l'astre dans le catalogue. Exemple : AG Bonn 9419, AG Leipzig 742... Le nombre d'étoiles de l'AGK1 est de près de deux cent mille réparties sur tout le ciel. La précision est la même que celle du catalogue de Lalande.

Les observateurs d'étoiles doubles du début du siècle, en particulier Aitken et Hussey, identifient leurs découvertes par rapport au catalogue de Lalande et à l'AGK1.

Mais les catalogues d'étoiles doivent être refaits à intervalles réguliers, parce que la position des étoiles varie par suite de leur mouvement propre et de celui des plans fondamentaux. Le jour où ces mouvements seront parfaitement connus, il suffira d'extrapoler les positions extraites des catalogues, mais ce jour n'arrivera jamais parce qu'on est de plus en plus exigeant et que la technique des observations fait des progrès constants à chaque époque.

Dès 1930, les étoiles de l'AGK1 sont donc réobservées à l'aide de l'astrographe de Bergedorf à Hambourg en vue d'une réédition permettant de connaître le mouvement propre de toutes les étoiles observées.

Entre-temps, en 1937, paraît le General Catalogue of 33342 stars for the epoch 1950 de B. Boss, communément désigné par les initiales GC. Cet ouvrage rassemble toutes les étoiles dont la position a fait l'objet de mesures précises aux cercles méridiens. Malgré son titre ce n'est pas un catalogue général. Son avantage a été de fournir, dès sa parution, des mouvements propres en grand nombre, et de permettre l'élaboration de la dynamique stellaire moderne.

Pressé d'avoir la connaissance du mouvement propre de nombreux astres, F. Schlesinger et I. Barney à l'observatoire Yale aux Etats-Unis, réobservent les étoiles de l'AGK1 dès 1928, avec un astrographe à grand angle. Le catalogue de Yale, publié de 1939 à 1959, contient 137 668 étoiles, il donne les magnitudes visuelles et photographiques, ainsi que les types spectraux et les mouvements propres. Sa précision, toutefois, n'atteint pas celle du GC.

Le nouveau catalogue faisant suite à l'AGK1 est paru en 1954 sous le titre *Zweiter Katalog der Astronomische Gesellschaft für das Aquinoktium 1950*. C'est l'AGK2. C'est un ouvrage homogène et non une suite un peu disparate comme le précédent. Il comprend 183 312 étoiles de la déclinaison - 2° au pôle Nord. On n'y trouve donc pas tout le ciel, mais seulement la portion de sphère aisément accessible à l'astrographe de Hambourg. Les positions ont la même précision, mais les magnitudes sont photographiques. On donne aussi, et cela est d'une géniale commodité, pour chaque étoile la référence au catalogue général d'Argelander, que nous étudierons un peu plus loin.

Afin de préciser les mouvements propres, il était prévu de reprendre les clichés de l'AGK2 dès 1958 pour aboutir à un AGK3. Ce catalogue n'est pas encore publié, mais il existe en bandes magnétiques. Les étoiles portent le même numéro dans l'AGK2 et l'AGK3, ce qui est pratique. Ce dernier est plus précis, les positions sont données à 0,001 s et 0",01, on trouve les mouvements propres annuels avec quatre décimales, ainsi que les types spectraux, les magnitudes photographiques, les références au catalogue d'Argelander. L'AGK3 est une source fondamentale de données pour l'astrométriste, c'est l'instrument de travail à la fois le plus sûr et le plus complet qui existe.

Les catalogues AGK3 et de Yale ne couvrent qu'une partie du ciel, insuffisante pour étudier les orbites des satellites artificiels. Il a donc fallu composer un catalogue dans ce but, couvrant le ciel entier. C'est le Smithsonian Astrophysical Observatory qui s'est chargé de ce travail, et a publié, en 1966, un catalogue appelé *SAO Star Catalog*. Il contient en quatre parties la position, le mouvement propre, les spectres de 258 997 étoiles sur l'ensemble du ciel, avec références aux catalogues AGK2, de Yale et d'Argelander. Il résulte d'ailleurs d'une combinaison des AGK, des étoiles de Yale et du FK4. Il est utilisable aussi sous forme de bandes magnétiques. Il est moins dense que l'AGK2 et 3, surtout dans les régions de la Voie lactée, mais il couvre tout le ciel. En particulier, les calculs d'occultation en vue de détecter des nouvelles binaires sont faits à partir de ce catalogue.

Les catalogues généraux

On appelle catalogue général, une liste exhaustive d'objets jusqu'à une magnitude donnée. Il existe deux catalogues stellaires généraux : le catalogue d'Argelander et celui construit à partir de la Carte du Ciel.

Le catalogue d'Argelander est le repère fondamental des étoiles doubles. Il date de 1850. Les étoiles y sont désignées par les symboles BD (*Bonner Durchmusterung*) ou DM. Au total le catalogue contient 457 847 étoiles du pôle Nord à la déclinaison — 23°.

Argelander adopte une présentation nouvelle, très commode : son catalogue est divisé en zones de un degré; dans chaque zone les étoiles se suivent par ordre d'ascension droite, ainsi on écrira BD + 31°21'52" (9,0) avec la magnitude entre parenthèses. Comme il y a près de cinq mille étoiles par zone, sauf près du Pôle, une telle disposition indique approximativement la place de l'étoile dans le ciel. Cette présentation a été reprise dans le catalogue AGK2.

Argelander a exécuté ses observations à Bonn avec une petite lunette de 72 mm, dans le temps remarquablement court de dix ans. Il avait pour but de recenser toutes les étoiles jusqu'à la magnitude 9, et les plus lumineuses de 9 à 10. Près de la moitié des étoiles sont de cette dernière catégorie. A l'usage on s'aperçoit que beaucoup d'étoiles BD sont de magnitude 10 et même 11. Les positions, pour l'équinoxe 1855, sont grossières, au dixième de seconde et au dixième de minute d'arc, ce qui rend cet ouvrage malheureusement insuffisant pour le calcul des orbites des astres errants. Néanmoins il a le mérite de recenser tous les objets et constitue pour cela un remarquable document, facile à consulter, toujours en usage par de nombreux observateurs.

Le recensement des étoiles a été étendu plus tard jusqu'au pôle Sud par Schoenfeld, élève d'Argelander, puis photographiquement au Cap (*Cape Photographie Durchmusterung*).

L'imprécision des positions du catalogue d'Argelander et les besoins croissants de l'astronomie imposèrent, vers 1900, un nouveau catalogue général beaucoup plus étendu. C'est l'observatoire de Paris qui prend en charge ce nouveau travail : la Carte du Ciel. Mais le catalogue de la Carte est d'un maniement lourd, inadapté aux besoins immédiats de l'observateur à l'oculaire, car le nombre des étoiles dépasse dix millions et leurs coordonnées sont linéaires. L'observateur se réfère donc toujours au catalogue d'Argelander (BD) pour repérer les étoiles la nuit et ne pas se perdre dans le ciel. Nous allons étudier succinctement la pratique de l'identification.

Pratique du repérage des étoiles BD. Rien ne ressemble plus à une étoile de magnitude 9,5 qu'une autre étoile de magnitude 9,5. Elles sont des centaines de milliers. Comment l'astronome, à l'oculaire puissant d'un grand instrument, se repère-t-il?

En début de nuit, il faut connaître la précession, qu'on estime en pointant une étoile très brillante. La précession varie au cours de la nuit, régulièrement; sa valeur en ascension droite est pratiquement constante, celle en déclinaison s'annule pour 6 h et 18 h et est maximum et de signe contraire pour 0 et 12 h. En gros, assez loin du Pôle, la précession en ascension droite est de 3 secondes par an, sa valeur maximum en déclinaison est de 8 minutes pour 25 ans. Connaissant bien la précession, on est à même de pointer les astres sans faire de pénibles corrections d'équinoxe.

Comme le BD contient toutes les étoiles plus lumineuses que la magnitude 9,5, on est sûr d'y trouver les étoiles suffisamment brillantes. Pour identifier une étoile, on dessine un croquis de la position de deux ou trois étoiles du champ du chercheur, ou de l'instrument principal, si elles sont assez groupées. On note au chronomètre les différences de temps de passage des astres sur un fil du micromètre placé dans le sens nord-sud, puis on estime à l'oeil, ou on lit au cercle, les différences de déclinaison et on écrit les magnitudes estimées. La figure 1-V reproduit un croquis pris le 24 juin 1976 à la lunette de 50 cm de Nice pour repérer une nouvelle étoile double BD + 31° 3890. Il n'est pas nécessaire que le croquis reproduise fidèlement la position mutuelle des étoiles, puisqu'on y note les différences, mais il est important d'indiquer la position du nord. On détermine, après lectures sur les cercles, les coordonnées approximatives (α , δ) d'une des étoiles, en général la plus brillante, et on cherche dans le catalogue le groupe dont les différences sont les mêmes, aux erreurs d'estimation près. Cette façon d'opérer est rapide et pratique. S'il y a doute, on prend un croquis d'un plus grand nombre d'étoiles.

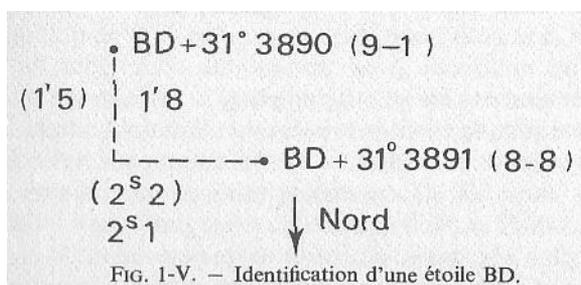


FIG. 1-V. — Identification d'une étoile BD.

On note sur un schéma les positions relatives des étoiles aperçues dans la lunette avec estimation des écarts entre parenthèses. Les valeurs exactes, retrouvées dans le catalogue, permettent l'identification.

Réciproquement, pour pointer avec certitude une étoile BD, on doit retrouver sur le ciel les différences du catalogue entre les objets voisins. Un tel exercice est le premier pas que tout stagiaire accomplit au début. Le repérage est parfois délicat dans les très grands instruments, à cause des flexions. Par exemple il nous arrive de vérifier à la grande lunette de 76 cm de Nice des étoiles doubles nouvelles faibles et serrées trouvées à la 50 cm. Il faut commencer par pointer une étoile brillante dans le voisinage et lire les corrections instrumentales, avant d'essayer de retrouver sur le ciel le croquis de repérage.

Dans toutes ces opérations, l'astronome ne fait aucun calcul, tout se passe en lectures de cercles, de chronomètres et estimations oculaires. On a une chance sur deux de se tromper dans les signes, et de s'énervier, si on se livre à des calculs même simples en pleine nuit, en équilibre sur une échelle par temps froid. Ajoutons d'ailleurs que parfois les cercles de déclinaison sont gravés en distances polaires et que les chiffres y sont lus à l'envers; l'astronome ne s'en préoccupe plus au bout de quelques séances, il s'automatise.

Une identification d'étoile faible exige une dose de patience. On a toujours tendance à repousser un problème qui se pose brusquement en observant. Bien des erreurs de catalogue, bien des astres perdus ont été reconnus par de patients observateurs, dont les registres d'observations fourmillent de notes précises qu'on devrait toujours pouvoir consulter. Un des premiers devoirs des observatoires est de conserver ces registres avec le plus grand soin.

La Carte du Ciel est donc une entreprise élaborée par l'observatoire de Paris au début du siècle. Elle consiste à photographier le ciel sur plaques carrées de deux degrés de côté, à l'aide d'astrographes sensiblement identiques, répartis en latitudes. Dix-huit, puis vingt observatoires, ont participé à ce travail. Chaque observatoire était muni d'un astrographe réfracteur de 33 cm d'ouverture, d'une distance focale voisine de 3,44 m donnant une échelle de un millimètre pour une minute d'arc. Plus de douze millions d'étoiles ont été photographiées, la position de plusieurs millions a été réduite en coordonnées rectilignes rectangulaires.

Il sort du cadre de ce livre de donner les équations fondamentales de passage entre les coordonnées linéaires des plaques et les ascensions droites et déclinaisons. C'est un problème classique de passage du plan à la sphère céleste et réciproquement. On trouvera ce problème exposé dans les traités d'astrométrie à grand champ.

Notre but étant l'identification d'étoiles ne nécessite pas de formules rigoureuses encombrantes, mais simples, calculables de tête. Nous verrons sur un exemple qu'on peut identifier toute étoile, et obtenir ses coordonnées célestes à la précision de la Carte du Ciel, à l'aide de calculs immédiats.

En fait, il s'agit, connaissant l'ascension droite et la déclinaison, de retrouver, dans les fascicules de la Carte, une étoile trop faible pour être dans le catalogue BD. On trouvera ce problème très bien traité dans le Journal des observateurs de février 1928 par I. Lagarde. Comme nous travaillons dans un rayon de quelques minutes d'arc, à « petit champ » on peut le simplifier encore et rendre sa solution immédiate.

1. On prend un croquis du champ de l'étoile à identifier. Ce croquis comporte au moins deux étoiles : l'étoile en question et une voisine assez lumineuse pour se trouver dans le catalogue BD ou mieux dans l'AGK2.

2. On regarde dans les catalogues les coordonnées célestes de l'étoile lumineuse, ce qui permet de savoir dans quelle zone, puis dans quel cliché de la zone on la trouvera. On a intérêt à choisir l'équinoxe 1900 pour les calculs.

3. Les coordonnées rectangulaires approchées X et Y de l'étoile dont on connaît les α , δ sont :

$$\begin{aligned} X &= (1/4)(\alpha - A) \cdot \cos \delta \\ Y &= (\delta - D) \end{aligned} \quad (1, V)$$

A et D sont les coordonnées du centre théorique du cliché. Les différences ($\alpha - A$) sont exprimées en secondes de temps et ($\delta - D$) en minutes. Les équations (1,V) confondent le plan tangent et la sphère, ce qui n'introduit aucune erreur appréciable pouvant empêcher l'identification.

4. Les coordonnées x et y des catalogues sont reliées aux X et Y par des équations linéaires de la forme :

$$\begin{aligned} X &= K(x + Ax + By + C) \\ Y &= K(y + A'x + B'y + C') \end{aligned} \quad (2, V)$$

K, A, B, C, A', B', C' sont des constantes connues pour chaque cliché. Pour ce qui nous concerne on peut négliger les A, B, A', B'. On transforme donc les X, Y en coordonnées x, y du catalogue à l'aide du tableau suivant qui donne les formules de passage simplifiées pour chacun des astrographes de la Carte du Ciel.

| Observatoire | Zones | Équations simplifiées de Passage | |
|----------------|---------------|----------------------------------|----------------------------|
| Greenwich | + 65° à + 90° | $x = 0,2 \cdot X - c + 14$ | $y = 0,2 \cdot Y - f + 14$ |
| Vatican | + 55 à + 64 | $x = 0,2 \cdot X + 13 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 13 + F$ |
| Catane | + 47 à + 54 | $x = X - c$ | $y = Y - c'$ |
| Helsingfors | + 40 à + 46 | $x = X$ | $y = Y$ (1) |
| Hyderabad | + 36 à + 39 | $x = 0,2 \cdot X + 13 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 13 + F$ |
| Uccle-Paris | + 34 & + 35 | $x = X$ | $y = Y$ |
| Potsdam-Oxford | + 32 & + 33 | $x = 0,2 \cdot X + 13 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 13 + F$ |
| Oxford | + 25 à + 31 | $x = 0,2 \cdot X + 13 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 13 + F$ |
| Paris | + 18 à + 24 | $x = X$ | $y = Y$ (2) |
| Bordeaux | + 11 à + 17 | $x = X - A$ | $y = Y - A'$ |
| Toulouse | + 5 à + 10 | $x = X$ | $y = Y$ |
| Alger | - 2 à + 4 | $x = X$ | $y = Y$ |
| San Fernando | - 3 à - 9 | $x = X - cX$ | $y = Y - cy$ |
| Tacubaya | - 10 à - 16 | $x = 0,2 \cdot X - c$ | $y = 0,2 \cdot Y - c'$ |
| Hyderabad | - 17 à - 23 | $x = 0,2 \cdot X + 13 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 13 + F$ |
| Cordoba | - 24 à - 31 | $x = 0,2 \cdot X + 13 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 13 + F$ |
| Perth | - 32 à - 40 | $x = 0,2 \cdot X + 13 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 13 + F$ |
| Le Cap | - 41 à - 51 | $x = X$ | $y = Y$ |
| Sydney | - 52 à - 64 | $x = -0,2 \cdot X + 14 + C$ | $y = 0,2 \cdot Y + 43 + F$ |
| Melbourne | - 65 à - 90 | $x = X - c$ | $y = Y - f$ |

(1) Le catalogue donne les (α , δ) pour 1900.

(2) Les étoiles plus lumineuses que la magnitude photographique 10 ont les (α , δ) 1900 publiées. Le tableau donne le nom de l'observatoire, les zones qui lui sont attribuées, et les formules dont les constantes sont données en tête de chaque cliché.

5. Les x , y ainsi calculés sont très voisins de ceux du catalogue, on les trouve par un simple coup d'oeil : x^* et y^* . D'autre part, on a noté sur le croquis les différences $\Delta\alpha$ et $\Delta\delta$ entre l'étoile lumineuse et l'étoile à identifier. On les convertit en :

$$\Delta x = (4/K) \cdot \cos \delta \cdot \Delta\alpha \text{ et } \Delta y = \Delta\delta/K \quad (3, V)$$

ce qui permet d'avoir les coordonnées linéaires approchées de l'astre à identifier :

$$x^* + \Delta x \text{ et } y^* + \Delta y. \text{ On les lit sur le catalogue :}$$

$$x^* + \Delta x^* \text{ et } y^* + \Delta y^*$$

Les différences exactes Δx^* , Δy^* donnent les $\Delta\alpha^*$ et $\Delta\delta^*$ qu'il faut appliquer aux coordonnées célestes α , δ de l'étoile lumineuse, connues par ailleurs. Les magnitudes photographiques sont indiquées dans le catalogue de la Carte par un nombre qui lui est lié. Quelquefois, dans les régions peuplées, il faut prendre un croquis de quatre ou cinq étoiles pour ne pas hésiter dans les identifications.

Exemple d'identification. On choisit un exemple extrait du registre d'observation du 16 novembre 1971 à la lunette de 50 cm. En regardant l'étoile

$$\text{AGK2} + 23^\circ 586 \text{ (11,2)} = \text{BD} + 23^\circ 1147 \text{ (9,5)}$$

nous remarquons un couple inconnu dans le champ; ce couple est trop faible d'éclat pour être dans le catalogue BD, il faut le trouver dans la Carte du Ciel.

1. On prend un croquis du champ à l'aide du chronomètre. Le reste se fait le lendemain au bureau (fig. 2-V).

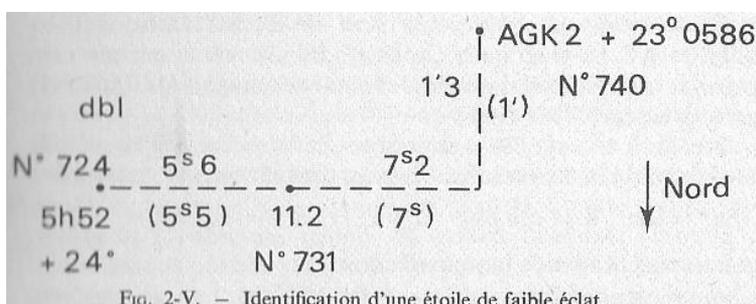


FIG. 2-V. — Identification d'une étoile de faible éclat.

On retrouve, dans la Carte du Ciel, les écarts observés, notés entre parenthèses.

2. On calcule les coordonnées 1900 de l'étoile

$$\text{AGK2} + 23^\circ 586 \alpha = 5 \text{ h } 55 \text{ m } 00 \text{ s } 9 \quad \delta = + 23^\circ 54' 50''$$

Il faut donc chercher l'étoile dans la zone de Paris, sur le cliché centré sur :

$$D = + 24^\circ, A = 5 \text{ h } 52 \text{ m}.$$

3. On calcule les coordonnées linéaires approchées :

$$X = 0,25 \cdot (\alpha - A) \cdot \cos \delta = 41,35$$

$$Y = \delta - D = - 5,2$$

4. Pour Paris on a les formules de passage $x = X$ et $y = Y$, on trouve dans le catalogue les vraies valeurs :

$$x^* = 41,51 \quad y^* = - 5,13$$

C'est l'étoile N° 740 du cliché, de magnitude 11,0.

5. On identifie la nouvelle double :

$$\Delta x = - 12,5 \cdot 1/4 \cdot \cos \delta = - 2,86$$

$$\Delta y = + 1'$$

d'où

$$x^* + \Delta x = 41,51 - 2,86 = 38,65$$

$$y^* + \Delta y = - 5,13 + 1 = - 4,13$$

on trouve dans le catalogue :

$$x^* + \Delta x^* = 38,58$$

$$y^* + \Delta y^* = - 3,89$$

c'est la N° 724 de magnitude 10,3. La nouvelle étoile double est donc :

$$\text{Paris} + 24^\circ 5 \text{ h } 52 \text{ N}^\circ 724 \text{ (10,3)}$$

Quelquefois on remplace le nom de l'observatoire par les initiales AC (Astrographic Catalog). Par la même occasion on note que la petite étoile intermédiaire notée de magnitude 11,2 sur le croquis est la N° 731 (10,8).

Il reste à trouver les coordonnées célestes exactes de l'étoile double nouvelle. Les vraies différences sont extraites du catalogue :

$$\Delta\alpha^* = \Delta x \cdot K / (4 \cos \delta) = 12 \text{ s } 8$$

$$\Delta\delta^* = K \cdot \Delta y = + 1'3$$

et on a la position de la nouvelle double :

$$\alpha = 5 \text{ h } 54 \text{ m } 48 \text{ s } 1$$

$$\delta = + 23^\circ 56' 08'' \quad (\text{équinoxe 1900})$$

comme les clichés de la Carte du Ciel se recouvrent, une étoile est presque toujours sur deux d'entre eux. On choisit le cliché où elle se trouve le plus près du centre. Enfin pour faciliter le travail des observateurs qui seront amenés à étudier cette étoile, il est d'usage d'indiquer les écarts en secondes et minutes de déclinaison avec l'étoile BD la plus voisine. L'identification complète de la nouvelle binaire est donc:

$$\text{Paris } + 24^\circ 5 \text{ h } 52 \text{ N}^\circ 724 (10,3)$$

$$5 \text{ h } 57 \text{ m } 9 + 23^\circ 56 (1950)$$

$$\text{à } - 13 \text{ s et } + 1' \text{ de BD } + 23^\circ 1147 (9,5)$$

Catalogues spéciaux

Comme leur nom l'indique, ce sont des listes d'étoiles ayant fait l'objet d'observations particulières, ou ayant des caractères communs. Les catalogues spéciaux sont nombreux, nous n'en mentionnerons que quelques-uns très utiles aux observateurs d'étoiles doubles. Ces derniers sont surtout intéressés par les couples en mouvement orbital, donc à forte parallaxe. Ils recherchent des critères de proximité qu'on trouve dans les catalogues de parallaxes trigonométriques, de mouvements propres, de types spectraux particuliers.

Citons d'abord le General Catalogue of Trigonometrical Parallaxes de L. Jenkins (1952) et son supplément de 1963. On y trouve les parallaxes et mouvements propres de près de six mille étoiles.

Le catalogue d'étoiles proches de W. Gliese (1969) donne les parallaxes, les mouvements propres et une foule de notes. Il est plus utile à l'observateur d'étoiles doubles que l'ouvrage de L. Jenkins qui n'est pas un catalogue d'étoiles proches.

L'observatoire Lowell à Flagstaff (U.S.A.) a publié en 1971 un catalogue de 9 000 étoiles à très grands mouvements propres contenant aussi les magnitudes et les indices de couleur des objets. La position des étoiles est donnée à une seconde près et au dixième de minute en déclinaison, avec références éventuelles aux catalogues de Yale et d'Argelander. Ce catalogue est un résultat de la chasse aux naines rouges et blanches, vigoureusement menée entre autres par W. J. Luyten et H. L. Giclas. Cet important travail contient en réserve de nombreuses doubles inconnues, mais leur découverte demandera de puissants objectifs, car les objets sont de faible éclat. Le catalogue de Lowell fournit la matière première du programme de recherches de parallaxes trigonométriques de faibles étoiles entrepris par K. Aa. Strand, au télescope astrométrique de l'observatoire de la Marine américaine. Déjà deux cents parallaxes d'étoiles ultra-naines ont été publiées en quelques années.

Un catalogue de faibles étoiles rouges est paru en 1947 à l'observatoire Dearborn. Malgré le titre Surrey of faint red stars ce sont des astres assez lumineux, accessibles visuellement aux instruments moyens. On trouve dans cet ouvrage près de vingt mille objets, dont le caractère spectral est basé sur la visibilité des bandes d'absorption de l'oxyde de titane. Malheureusement les positions manquent de précision et on ne donne pas de références à d'autres catalogues.

Pour en terminer avec les catalogues spéciaux, il convient de signaler le Henry Draper Catalogue, en abrégé HD, qui donne les spectres de 222 000 étoiles réparties sur tout le ciel. Cet important travail exécuté par l'observatoire de l'université Harvard à Cambridge et à Arequipa a été publié de 1918 à 1924. Le catalogue HD sert de référence pour les clichés de spectres stellaires. Heureusement on y trouve les correspondances au catalogue BD, ce qui permet l'identification, car les positions du HD sont imprécises. Les observateurs d'étoiles doubles n'identifient jamais leurs étoiles par rapport au HD, qui est contenu pratiquement dans l'AGK3 et le SAO, mais les « spectroscopistes » semblent ignorer ces derniers. Il faut dire qu'ils observent presque toujours des étoiles lumineuses dont l'identification est évidente. N'empêche que c'est aux astrométristes de contrôler les objets.

En règle générale, il faut toujours donner la référence d'une étoile à un catalogue, en plus de sa position et de sa magnitude, ou bien donner la référence à deux catalogues et la magnitude. Les observateurs perdent un temps précieux à retrouver les coordonnées des étoiles qu'on leur signale parfois. Il arrive même que les objets sont extraits sans commentaire de catalogues peu connus, indiqués par des initiales intraduisibles, sans position ni magnitude, d'ailleurs celui qui nomme l'objet ne connaît pas toujours la signification des abréviations utilisées par ses prédécesseurs et qu'il ne fait que reproduire.

NOTES BIBLIOGRAPHIQUES

Catalogues fondamentaux. — On trouvera l'histoire des catalogues fondamentaux dans le plus récent d'entre eux:

W. FRICKE & A. Kopff. — Fourth fundamental catalogue FK4. Veröff. Astron. Rechen-Institute, Heidelberg, n° 10, 1963.

Une abondante bibliographie est donnée par :

F. P. Scott — The Systems of Fundamental Proper Motions. Basic Astron. Data, chap. II, Chicago Press, 1963.

Catalogues intermédiaires. — L'histoire des catalogues antérieurs à 1900 est décrit dans l'ouvrage de :

Ch. ANDRÉ. — Traité d'astronomie stellaire, Gauthier-Villars, 1899.

B. Boss. — General catalogue of 33.342 stars for the epoch 1950. Carnegie Inst., Washington, 1937.

Les fascicules de l'AGK2 ont pour auteurs :

R. SCHORR & A. Kohlschütter. — Zweiter Katalog der Astronomischen Gesellschaft für das Äquinoktium 1950, Hambourg-Bergedorf, 1954.

Le catalogue de Yale est paru en vingt fascicules des « Transactions of the astronomical observatory of Yale University » de 1939 à 1959. Le Star Catalog (SAO) a été édité par le Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts, 1966.

Catalogues généraux. — Le catalogue d'Argelander a été réédité en 1903.

F. ARGELANDER. — Bonner Durchmusterung des Nördlichen Himmels. Bonn, 1903.

On trouvera dans le texte la liste des observatoires qui ont contribué à la Carte du Ciel. Quelques résultats n'ont été publiés qu'après la Seconde Guerre mondiale, ce sont les zones : + 32 et + 33 en 1953, + 34 en 1960, + 35 en 1962, + 36 en 1946. Signalons deux ouvrages précieux.

1. Catalogue photographique du ciel. Ascensions droites et déclinaisons déduites des coordonnées rectilignes pour toutes les étoiles jusqu'à la grandeur 9,9 (équinoxe 1900,0). Zones + 18°, 20°, 22°, 24°. Observatoire de Paris. Gauthier-Villars, 1946.

2. Catalogues de 11 755 étoiles de la zone + 17 à + 25° et de magnitude 9,5 à 10,5 destinées à servir de références pour la détermination des mouvements propres des étoiles du catalogue photographique de Paris. Observatoire de Paris, 1950.

G. VAN BIESBROECK. — Stars catalogues and charts. Basic Astron. Data. p. 471, Chicago Press, 1963.

L'article donne des tables pratiques pour calculer la position des étoiles à partir des coordonnées rectilignes des clichés de la Carte du Ciel.

O. HECKMANN, W. DIECKVOSS and H. Kox. — New Plate constants in the system of the FK3 for the declination zones + 21°, + 22°, + 23°. + 24° of the astrographic catalogue. Paris. A. J., vol. LIX, p. 143, 1954.

Catalogues spéciaux

S. ARAVAMUDAN. — Stars with large proper motions in the astrographic zones + 32° and + 33°. J. des Obs., vol. XLII, p. 123, 1959. On y trouvera les références à deux listes précédentes.

V. M. BLANCO, S. SEMERS, G. G. DOUGLASS and M. P. FITZGERALD. — Photometric Catalogue. Magnitudes and colors in the U, B, V and U, B, V systems. Publ. U.S.N.O. Sec. Ser., vol. XXI, 1970.

On y trouve 20 705 objets dont beaucoup d'étoiles doubles classiques, les types et classes spectraux sont donnés.

A. J. CANNON and E. C. PICKERING. — The Henry Draper Catalogue. Ann. Harvard Obs., vol. XCI et suivants, 1918.

H. L. GICLAS, R. BURNHAM Jr and N. G. THOMAS. — Lowell proper motion survey Northern Hemisphere. The G numbered stars. 8 991 stars fainter than magnitude 8 with motions > ".26/year. Flagstaff, 1971.

W. GLIESE. — Catalogue of nearby stars. Institut Heidelberg, n° 22, 1969.

D. HOFFLEIT — Catalogue of Bright stars, Yale Univ., 1964.

L. F. JENKINS. — General catalogue of trigonometric stellar parallaxes, Yale Univ., 1952.

- L. F. JENKINS. — Supplement to the general catalogue of trigonometric stellar parallaxes, Yale Univ., 1963.
- A. R. KLEMOLA, S. VASILEVSKIS, C. D. SHANE and C. A. WIRTANEN. — Catalogue of proper motions of 8 790 stars with reference to galaxies. Publ. Lick Obs. XXII, part II, 1971.
- O. J. LEE, R. J. BALDWIN, T. J. BARTLETT, G. D. GORE and D. W. HAMLIN. — Dearborn catalog of faint red stars. Titanium oxide stars. Ann. Dearborn Obs. Vol. V, part 1 A, 1943, 1 B, 1944, 1 C, 1947.
- R. K. RIDDLE. — First Catalog of trigonometric parallaxes of faint stars. Astrometric results. Publ. U.S.N.O. Sec. Ser., vol. XX, part III, 1970.
- P. M. ROUTLY. — Second Catalog of trigonometric parallaxes of faint stars. Publ. U.S.N.O. Sec. Ser., vol. XX, part VI, 1972.
- A. N. VYSSOTSKY. — Dwarf M stars found spectrophotometrically. ,A. J., vol. LXI, n° 5, 1956.
- On trouvera les références aux autres listes totalisant 876 objets. C. E. Worley a découvert trente couples serrés dans ces listes.

CALCUL DES ORBITES ET DES MASSES STELLAIRES

But de l'observation des étoiles doubles

Le but de l'observation des étoiles doubles est d'obtenir des orbites, qui donnent accès aux masses si les distances au système solaire sont connues. Dans ce cas, on connaît les masses à partir de mouvements observés. Ce sont des masses fondamentales ou géométriques, elles ne reposent sur d'autre hypothèse que la validité des lois et des constantes de la gravitation. Tout autre procédé fait appel à des hypothèses, plus ou moins plausibles, sur des caractéristiques stellaires: on obtient ainsi des masses dites photométriques ou spectroscopiques... On verra que l'étude des orbites d'étoiles doubles permet d'obtenir des masses dites dynamiques et aussi de déterminer, dans certains cas, la parallaxe absolue, donc les masses, par la mesure de vitesses radiales.

Dans ce chapitre, après un rappel des notions de base nécessaires au calcul des orbites, nous passerons en revue quelques méthodes, puis nous les appliquerons au calcul des masses absolues, et des masses dynamiques. Enfin nous ferons un bilan de nos connaissances après deux siècles d'observation.

Orbite réelle

L'étoile satellite B, ou compagnon, se meut par rapport à l'étoile principale A, comme si celle-ci était un centre fixe d'attraction ayant une masse égale à celle du système. Le mouvement a lieu dans le sens direct ou dans le sens rétrograde.

Soit l'ellipse de centre O, l'un des foyers A. Le périastre P est l'extrémité du grand axe le plus proche de A, l'autre extrémité est l'apoastre. Les éléments, ou paramètres, de l'orbite réelle sont :

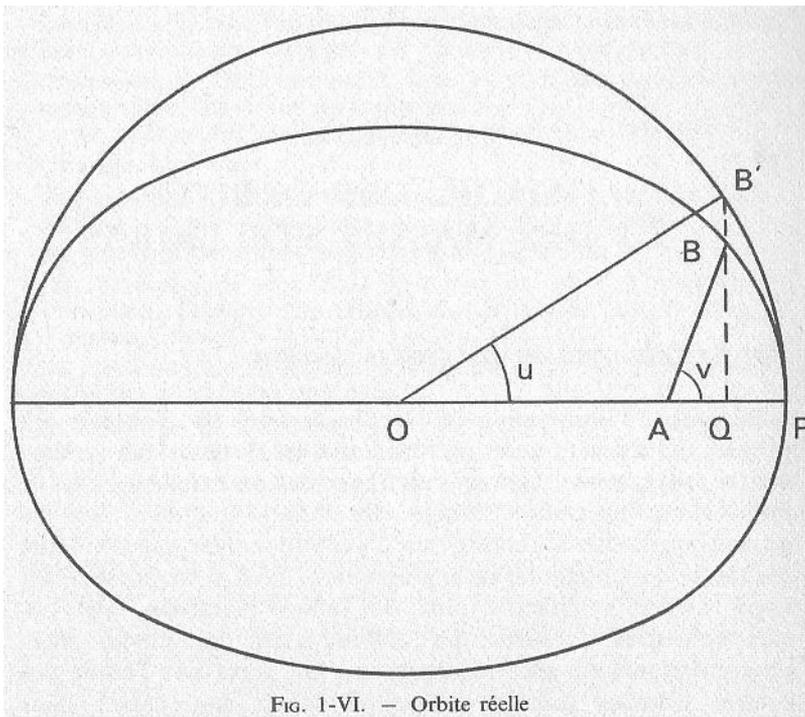


FIG. 1-VI. — Orbite réelle

la période de révolution du compagnon en années, P ,
le moyen mouvement annuel $n = 360/P$ ou $\mu = 2\pi/P$,
l'époque de passage au périastre T ,
l'excentricité de l'orbite e , on pose parfois $e = \sin \varphi$,
le demi-grand axe a , exprimé en valeur angulaire ou en unités astronomiques.

On démontre en mécanique céleste que la trajectoire de B, ou orbite, est une ellipse dont un des foyers est occupé par l'étoile principale A. Nous renvoyons aux traités spéciaux pour cette

démonstration. Nous insisterons ici sur ce qui est nécessaire au calcul des orbites, en supposant connues les propriétés géométriques élémentaires des coniques.

On se propose de déterminer en fonction du temps la position de l'étoile satellite B sur son orbite. Cette position est définie par deux paramètres : le rayon vecteur $AB = r$ et l'angle $v = PAB$ appelé anomalie vraie. Traçons la circonférence de rayon OP (fig. 1-VI). Cette circonférence est appelée improprement : cercle principal. Menons la perpendiculaire BB' sur OP , elle coupe OP en Q . L'angle auxiliaire $POB' = u$ est appelé anomalie excentrique. Prenons sur OP un sens positif de O vers P .

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AQ} &= \overrightarrow{AO} + \overrightarrow{OQ} = -e + a \cdot \cos u = r \cdot \cos v & (1, VI) \\ QB &= QB' \sqrt{1 - e^2} = a \sqrt{1 - e^2} \cdot \sin u = r \cdot \sin v & (2, VI) \end{aligned}$$

car l'ellipse est la projection du cercle principal, depuis un plan incliné d'un angle φ . De (1, VI) et (2, VI) on déduit:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos v} \quad (3, VI)$$

Il reste à relier l'anomalie vraie v au temps t . On y arrive par l'intermédiaire de l'anomalie excentrique u . On sait que le rayon vecteur balaie des aires égales en des temps égaux :

$$(1/2) \cdot r^2 \cdot dv/dt = C = \frac{\pi \cdot a^2 \cos \varphi}{P} = \frac{\mu \cdot a^2 \cos \varphi}{2}$$

C'est la constante des aires, égale à la surface de l'ellipse divisée par la période.

D'autre part :

$$\text{tang } v/2 = \sqrt{(1 + e)/(1 - e)} \cdot \text{tang } u/2 \quad (4, VI)$$

ce qui conduit par différentiation à : $du/dt = \mu/(1 - e \cdot \cos u)$

d'où par intégration : $u - e \cdot \sin u = \mu(t - T) = M$

Il est d'usage d'exprimer M en degrés, on a donc : $M = n(t - T)$ (5, VI)

M s'appelle l'anomalie moyenne, elle est proportionnelle au temps compté depuis le passage au périastre, c'est la position moyenne du compagnon. Tandis que v est sa position vraie. L'écart $(v - M)$ s'appelle équation du centre. On passe de M à v par des tables calculées par l'intermédiaire des équations (4, VI) et (5, VI).

On appelle coordonnées réduites de la composante B les quantités :

$$\begin{cases} X = \frac{r}{a} \cos v = \cos u - e \\ Y = \frac{r}{a} \sin v = \sqrt{1 - e^2} \sin u \end{cases} \quad (6, VI)$$

Des tables donnent ces quantités pour toutes les valeurs de M en fonction de l'excentricité.

Orbite apparente

L'orbite apparente résulte de la projection de l'ellipse réelle sur le plan du ciel. Aux éléments de l'orbite vraie, appelés éléments dynamiques, il faut ajouter des éléments géométriques définissant l'orientation de l'orbite vraie par rapport au plan céleste. Considérons la figure 2-VI dans laquelle on voit le plan de l'orbite vraie se projeter sur celui du ciel.

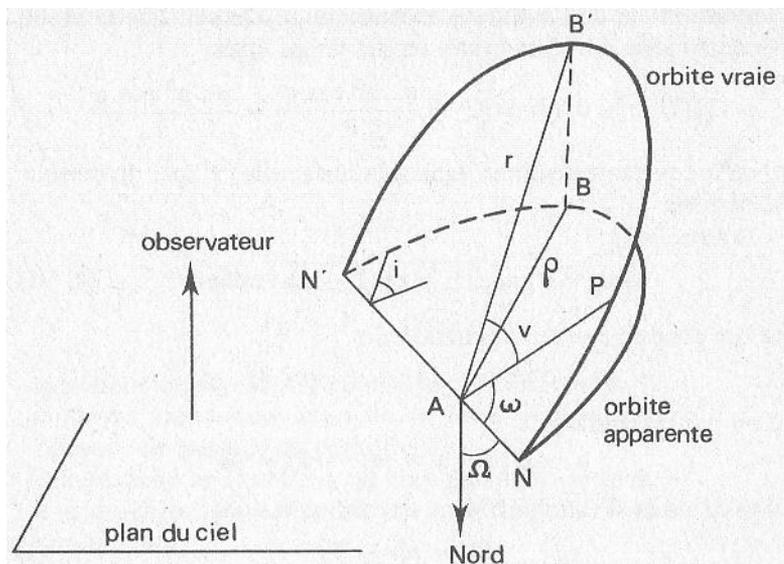


FIG. 2-VI. — Orbite apparente. Définition des paramètres.

L'intersection des deux plans est NN' . L'étoile principale A appartient aux deux plans. Le compagnon B' se projette en B . Le demi-grand axe de l'orbite vraie a est exprimé en secondes de degré. Il y a deux sortes d'éléments géométriques, ceux de Campbell et ceux de Thiele-Innes.

Éléments de Campbell. — Ce sont :

i l'inclinaison mutuelle du plan de l'orbite et du plan tangent à la sphère céleste. L'inclinaison est comprise entre 0 et 180° , elle est inférieure à 90° si le mouvement est direct,

Ω l'angle de position de l'intersection NN' . Cette intersection s'appelle ligne des noeuds. L'angle de position est compté à partir d'une origine arbitraire, la direction du pôle nord. La ligne des noeuds coupe l'ellipse en deux points, l'un N est le noeud ascendant, correspondant à une vitesse radiale d'approche, l'autre est le noeud descendant. En général on ignore lequel des noeuds est ascendant, alors parmi les deux valeurs possibles de Ω on choisit celle inférieure à 180°

ω l'angle entre le noeud ascendant et le périastre, mesuré dans le plan de l'orbite vraie et dans le sens du mouvement du compagnon.

Le tableau suivant résume les éléments d'une orbite d'étoile double visuelle.

| | | | |
|--|---|----------|---|
| éléments dynamiques | } | P | période en années |
| | | n | moyen mouvement en degrés par an $360/P$ |
| | | T | époque de passage au périastre |
| | | e | excentricité |
| éléments géométriques dits de Campbell | } | a | demi-grand axe |
| | | i | inclinaison |
| | | Ω | angle de position du noeud |
| | | ω | angle entre le noeud et le périastre |

Déterminer une orbite d'étoile double, c'est obtenir ses éléments à partir des observations.

Nous allons établir les équations de passage entre ces éléments et les paramètres d'observation, déjà étudiés au chapitre III, ρ la séparation, θ l'angle de position et le temps t .

D'après les définitions précédentes, on a sur la figure 2-VI où le mouvement est supposé direct :

$$\begin{array}{lll}
 AB = \rho & AB' = r & \\
 PAB = v & NAP = \omega & BAN = (\theta - \Omega)
 \end{array}$$

Projetons ρ et r sur la ligne des noeuds NN' , puis sur la perpendiculaire à la ligne des noeuds. On a d'abord :

$$\rho \cdot \cos(\theta - \Omega) = r \cdot \cos(v + \omega) \quad (7, VI) \text{ puis :}$$

$$\rho \cdot \sin(\theta - \Omega) = r \cdot \sin(v + \omega) \cdot \cos i \quad (8, VI) \text{ d'où les équations fondamentales :}$$

$$\begin{aligned} \text{tang}(\theta - \Omega) &= \text{tang}(v + \omega) \cdot \cos i \\ \rho &= r \frac{\cos(v + \omega)}{\cos(\theta - \Omega)} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos v} \cdot \frac{\cos(v + \omega)}{\cos(\theta - \Omega)} \quad (9, VI) \\ M &= n(t - T) \end{aligned}$$

Ajoutons à ces équations celle qui donne la composante radiale :

$$BB' = z = r \cdot \sin(v + \omega) \cdot \sin i \quad (10, VI)$$

Le jeu d'équations (9, VI) permet de calculer l'éphéméride d'une étoile double, c'est-à-dire un tableau donnant ρ et θ à intervalles de temps réguliers ou non.

Dans la pratique, il faut disposer d'une table du mouvement képlérien, qui donne l'anomalie vraie v ou bien l'équation du centre ($v - M$) en fonction de l'anomalie moyenne M , pour toute valeur de l'excentricité. On trouvera une table dans L'Astronomie générale de A. Danjon, p. 432. L'Académicien des sciences d'U.R.S.S. a publié, en 1960, une table très complète, malheureusement peu répandue en dehors des établissements astronomiques. L'emploi des calculatrices électroniques de poche rend le calcul d'une éphéméride immédiat. Nous donnons ci-contre un exemple.

Éléments de Thiele-Innes. — Choisissons un trièdre trirectangle ayant comme origine l'étoile principale A, l'axe Ax est dirigé vers le nord céleste, l'axe Ay vers les ascensions droites croissantes, et l'axe Az vers l'observateur.

Le compagnon B' se projette sur le ciel en B. On a : $AB = \rho$, $x_{AB} = \theta$, $AB' = r$. Les coordonnées de B' sont :

$$x = \rho \cdot \cos \theta \quad y = \rho \cdot \sin \theta \quad (11, VI) \text{ et } z \text{ donnée par (10, VI).}$$

ÉPHÉMÉRIDE DE CASTOR Orbite de Paul Muller (1956)

$$P=511,3 \quad n=0^\circ,70409 \quad T=1950,65 \quad a=7'',369$$

$$e = 0,36 \quad i = 112^\circ,94 \quad \Omega = 41^\circ,65 \quad \omega = 239^\circ,81$$

| t | t-T | M | v | v+ ω | tg(v+ ω) | tg($\theta - \Omega$) | $\theta - \Omega$ | θ |
|--------|--------|--------|--------------------|-------------|--------------------------|--|-------------------|----------|
| 1978,0 | 27,35 | 19°,26 | 41°,82 | 281°,63 | - 4,8587 | 1,8938 | 62°,16 | 103°,8 |
| 79,0 | 28,35 | 19,96 | 43,21 | 283,02 | - 4,3246 | 1,6856 | 59,32 | 101,0 |
| 80,0 | 29,35 | 20,67 | 44,60 | 284,41 | - 3,8919 | 1,5169 | 56,61 | 98,3 |
| 81,0 | 30,35 | 21,37 | 45,95 | 285,76 | - 3,5434 | 1,3811 | 54,09 | 95,7 |
| 82,0 | 31,35 | 22,07 | 47,29 | 287,10 | - 3,2506 | 1,2670 | 51,72 | 93,4 |
| 83,0 | 32,35 | 22,78 | 48,63 | 288,44 | - 2,9991 | 1,1690 | 49,45 | 91,1 |
| 84,0 | 33,35 | 23,48 | 49,95 | 289,76 | - 2,7837 | 1,0850 | 47,33 | 89,0 |
| t | cos v | r | cos(v + ω) | | cos($\theta - \Omega$) | cos(v+ ω)/cos($\theta - \Omega$) | | p |
| 1978,0 | 0,7452 | 5,0572 | 0,2016 | | 0,4669 | 0,4317 | | 2'',18 |
| 79,0 | ,7288 | 5,0808 | ,2253 | | ,5102 | ,4416 | | 2,24 |
| 80,0 | ,7120 | 5,1053 | ,2489 | | ,5504 | ,4521 | | 2,31 |
| 81,0 | ,6953 | 5,1299 | ,2716 | | ,5865 | ,4631 | | 2,38 |
| 82,0 | ,6783 | 5,1552 | ,2940 | | ,6196 | ,4746 | | 2,45 |
| 83,0 | ,6609 | 5,1812 | ,3163 | | ,6501 | ,4866 | | 2,52 |
| 84,0 | ,6435 | 5,2076 | ,3381 | | ,6777 | ,4988 | | 2,60 |

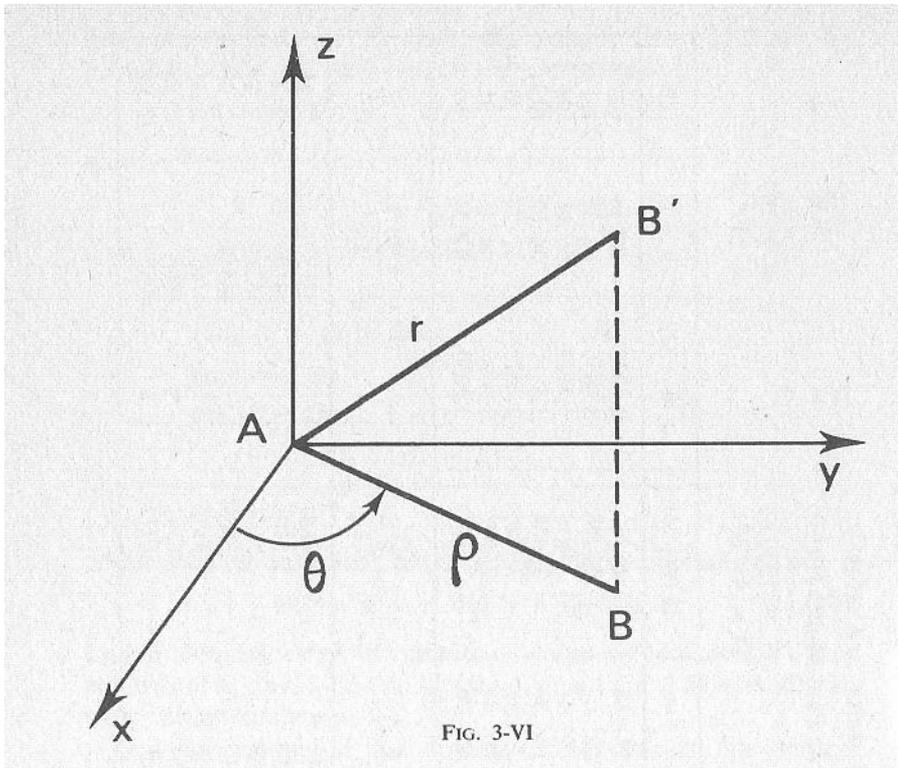


FIG. 3-VI

Faisant intervenir les coordonnées réduites (6, VI), on arrive après des calculs élémentaires à :

$$\begin{cases} x = AX + FY \\ y = BX + GY \\ z = CX + HY \end{cases} \quad (12, VI)$$

où :

$$\begin{cases} A = a(\cos \omega \cdot \cos \Omega - \sin \omega \cdot \sin \Omega \cdot \cos i) \\ B = a(\cos \omega \cdot \sin \Omega + \sin \omega \cdot \cos \Omega \cdot \cos i) \\ F = a(-\sin \omega \cdot \cos \Omega - \cos \omega \cdot \sin \Omega \cdot \cos i) \\ G = a(-\sin \omega \cdot \sin \Omega + \cos \omega \cdot \cos \Omega \cdot \cos i) \\ C = a \cdot \sin \omega \cdot \sin i \\ H = a \cdot \cos \omega \cdot \sin i \end{cases} \quad (13, VI)$$

Les constantes A, B, F, G, C, H, portent le nom d'éléments de Thiele-Innes, elles déterminent le plan de l'orbite vraie et sa dimension, tout comme les éléments de Campbell ω , Ω , i , a .

Écrivons encore les équations de passage des éléments de Thiele-Innes à ceux de Campbell. On les trouve aisément à l'aide des formules (13, VI) :

$$\begin{cases} \text{tang} (\Omega + \omega) = \frac{B - F}{A + G} \quad \text{avec } 0 < \Omega < 180^\circ \\ \text{tang} (\Omega - \omega) = \frac{B + F}{A - G} \\ \text{tang}^2 \frac{i}{2} = \frac{(B + F) \cdot \sin (\Omega + \omega)}{(B - F) \cdot \sin (\Omega - \omega)} \\ a^2 = \frac{A \cdot G - B \cdot F}{\cos i} \end{cases} \quad (14, VI)$$

Lorsqu'on donne les éléments d'une orbite d'étoile double visuelle, il est bon d'écrire les éléments de Campbell et de Thiele-Innes. Le calcul d'une éphéméride à l'aide des éléments de Thiele-Innes est presque immédiat à l'aide des tables des coordonnées réduites X et Y pour toute valeur de M en fonction de l'excentricité e. Toutefois ces tables sont d'un emploi laborieux, car les nombres à cinq décimales et leurs différences tabulaires sont écrits en petits caractères et demandent une grande attention des yeux. Une fois les X et Y obtenus, on a immédiatement par les équations (12_ VI)

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \theta = \text{arc tang } y/x$$

La vitesse radiale de la secondaire par rapport à la primaire est :

$$dz/dt = C dX/dt + H dY/dt = n \cdot C \cdot dX/dM + n \cdot H \cdot dY/dM$$

M en degrés. On a ainsi la vitesse radiale en secondes d'arc par année. On la réduit en km/s en introduisant la parallaxe absolue p, et un facteur de transformation des unités :

$$V_{\text{kms}} = L dX/dM + N dY/dM \quad (15, \text{VI})$$

avec : $L = 4,737 \cdot nC/pN=4,737 nH/p$

Remarquons encore que par (10, VI) on obtient

$$V_{\text{km/s}} = 4,737 \cdot \mu \cdot \frac{a \sin i}{p \cos \varphi} e \cdot \cos \omega + \cos (v + \omega) \quad (16, \text{VI})$$

a et p sont exprimés en secondes d'arc.

Les équations (15 et 16, VI) montrent que la mesure de la vitesse radiale relative donne une parallaxe absolue du système, lorsqu'on connaît les éléments de l'orbite.

Donnons encore quelques indications sur la signification géométrique des constantes A, B, F, G. On voit aisément que les coordonnées du centre de l'ellipse apparente sont :

$$x_c = -A \cdot e \quad y_c = -B \cdot e \quad (17, \text{VI})$$

Si on prend le centre de l'ellipse apparente comme origine de nouveaux axes ($\xi; \eta$) parallèles aux anciens et de même sens, on a pour un point d'anomalie vraie u :

$$\begin{cases} \xi = A \cdot \cos u + F_1 \cdot \sin u \\ \eta = B \cdot \cos u + G_1 \cdot \sin u \end{cases} \quad (18, \text{VI})$$

avec $F_1 = F \cdot \cos \varphi$, $G_1 = G \cdot \cos \varphi$. Ces équations montrent que A et B sont les coordonnées du périastre P par rapport au centre (u = 0) et que F_1 et G_1 sont les coordonnées du point d'anomalie vraie $u = 90^\circ$, qui se trouve sur le diamètre conjugué de la projection du grand axe, à l'intersection qu'on rencontre la première en partant de P dans le sens direct. Enfin les cosinus directeurs des directions positives du grand axe et du petit axe de l'orbite vraie sont :

A/a, B/a, C/a et F/a, G/a, H/a

En conclusion, les éléments complets d'une orbite sont résumés dans le tableau suivant.

| Éléments dynamiques | Éléments | |
|---------------------|-------------|-----------------|
| | de Campbell | de Thiele-Innes |
| P | | A |
| n | i | B |
| T | Ω | F |
| e | ω | G |
| a | | C |
| | | H |

Ces définitions étant posées, le calcul des éléments d'une orbite d'étoile double devient très simple.

Calcul des éléments d'une orbite d'étoile double

Il existe de nombreuses méthodes qui se répartissent en deux catégories : les procédés géométriques et les procédés analytiques. Les premiers sont plus expéditifs, mais conduisent à des éléments moins sûrs. Ils sont utiles en cas d'orbites mal observées parce que difficiles et réservées aux puissants instruments ou parce que la longueur de la période n'a permis d'observer qu'un arc plus ou moins significatif de la trajectoire entière.

Les périodes sont en général si longues, que le calculateur n'a pas la patience d'attendre qu'une orbite soit entièrement jalonnée par les observations. Dans la plupart des cas sa vie entière n'y suffirait pas. Il lui reste la ressource de recalculer des éléments antérieurs qui donnent une éphéméride en erreur avec l'observation, ou bien de se contenter d'une partie de l'ellipse apparente. Le cas idéal d'un couple

abondamment observé sur une révolution et n'ayant pas encore fait l'objet de calcul d'éléments n'existe pas dans la littérature. Si un tel cas existe, il est jalousement gardé secret par son découvreur, puissamment outillé, qui se réserve la priorité du calcul. De tels secrets de coupole sont de plus en plus rares, mais récompensent justement l'observateur assidu.

Il se calcule une soixantaine d'orbites par an dans le monde. Plus de la moitié sont des améliorations d'orbites déjà anciennes. Sur les sept ou huit cents orbites actuellement publiées, rares sont celles dont les éléments sont définitifs, quelques dizaines. Il y a donc du travail pour le calculateur.

La difficulté vient des erreurs de mesures. Seul un observateur bien entraîné, connaissant l'histoire des observations, est à même de trouver des éléments à peu près corrects à partir de mesures disparates, trop rares à certaines époques, surabondantes à d'autres. Il existe des observateurs dont les mesures ne peuvent être prises en défaut, d'autres au contraire qu'on peut ignorer. Mais il faut des années de pratique avant de savoir juger telle ou telle observation de tel couple. Les méthodes modernes de traitement numérique ne sont guère exploitables. Un calcul d'orbite d'étoile double restera toujours un travail d'artisan.

Avant de commencer le calcul proprement dit, il convient de ramener toutes les observations à un même équinoxe. En effet, le pôle céleste, qui sert de repère pour les angles de position, n'est pas fixe. Il faut donc appliquer une correction aux angles de position :

$$\Delta\theta = -0^{\circ}0056 \sin \alpha \cdot \sec \delta (t - t_0) \quad (19, VI)$$

t_0 étant l'époque choisie pour l'équinoxe et t l'époque de l'observation. En général on choisit pour t_0 une époque peu éloignée des premières observations afin d'avoir des corrections faibles ou négligeables, par exemple 1900 ou 1950. Les angles de position deviennent :

$$\theta_0 = \theta + \Delta\theta \quad (20, VI)$$

Le mouvement propre altère aussi les angles de position. On a parfois tort de ne pas en tenir compte, la correction s'écrit :

$$\Delta\theta = -0^{\circ}00417 \cdot \mu \alpha \cdot \sin \delta (t - t_0) \quad (21, VI)$$

où $\mu \alpha$, est exprimé en secondes de temps par an. Cette correction peut devenir importante au voisinage du pôle pour des couples à fort mouvement propre. Il existe d'autres corrections dues à la variation de la parallaxe avec le temps, elles sont négligeables.

Les erreurs commises en confondant la projection centrale avec une projection orthogonale sont aussi négligeables. Il faut savoir pourtant que la période observée n'est qu'apparente. La période réelle doit être diminuée, ou augmentée, du temps mis par la lumière pour parcourir le chemin dû à la vitesse radiale pendant une période; ce temps excède rarement quelques centièmes d'années.

Méthode géométrique. — Nous exposerons la plus simple de toutes, entièrement graphique, qui permet de calculer les éléments en quelques minutes une fois tracée l'ellipse apparente.

L'exactitude des éléments repose sur celle du tracé de cette ellipse, auquel il faut apporter le plus grand soin. Cette opération a été décrite par plusieurs auteurs français, en particulier A. Danjon et P. Baize. Elle consiste à reproduire sur un graphique les observations individuelles, ramenées à un même équinoxe. Si le compagnon a décrit plusieurs révolutions, on détermine au préalable la période par le retour du compagnon aux mêmes angles de position, et on groupe les observations en une même révolution. On choisit une échelle assez grande de façon à éliminer les erreurs de dessin, une trentaine de centimètres pour la dimension la plus grande convient.

Une fois les observations placées sur le graphique avec les époques et les noms des observateurs, on se trouve en présence d'un nuage de points souvent très éloignés du tracé cherché. On peut se guider en construisant la courbe $\theta(t)$ au préalable, à main levée. On remarque ainsi les observations aberrantes, ou manifestement erronées, il y en a toujours. Mais on se gardera de corriger les erreurs ainsi trouvées, la courbe $\theta(t)$ qu'on est amené à tracer ne peut être qu'approximative, son rôle est d'indiquer le sens et l'ordre de grandeur des erreurs de certaines observations qui seront traitées à part, ou carrément éliminées. Il n'est pas conseillé de construire la courbe $\rho(t)$, car les mesures de distance sont sujettes à de plus grandes erreurs.

Une fois les observations notées, il faut tracer une ellipse à travers le nuage de points. Cette ellipse doit satisfaire à la loi des aires. P. Baize conseille de tracer l'ellipse par le procédé classique du fil et des deux épingles. L'étoile principale A (fig. 4-VI) n'occupe pas un des foyers de l'ellipse apparente, puisque cette dernière est la projection sur le ciel de l'orbite réelle.

On choisit cinq à six points parmi les observations les meilleures, il faut que ces points soient réparties le long de l'ellipse; on les réunit à l'étoile A, et on mesure au planimètre les surfaces des secteurs ainsi définis, en unités quelconques. Si S_n est la surface d'un secteur n, et Δt_n le temps mis par le satellite pour le parcourir, la constante des aires s'écrit :

$$c = S_n / \Delta t_n \quad (22, VI)$$

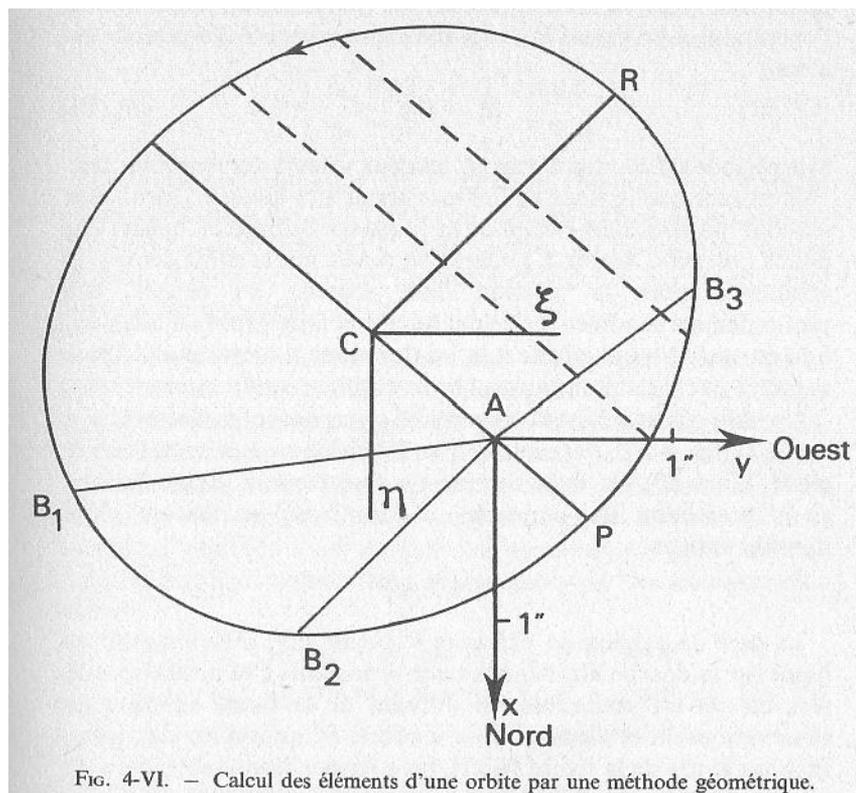


FIG. 4-VI. — Calcul des éléments d'une orbite par une méthode géométrique.

elle doit être la même dans tous les secteurs choisis. On n'y arrive pas sans longs tâtonnements qui rendent parfois méconnaissable le tracé d'abord choisi. Pour être satisfaisante, la valeur de la constante des aires ne doit varier que de quelques centièmes d'un secteur à l'autre, sinon les éléments trouvés ne pourront représenter correctement les observations. Une fois trouvée la constante des aires en unités quelconques, on mesure la surface de l'ellipse au planimètre avec les mêmes unités, on recommence plusieurs fois l'opération et on prend la moyenne des mesures S . La période est alors :

$$P = S/c \quad (23, VI)$$

Si la période est connue d'avance, les deux valeurs doivent coïncider.

Il est rare que le tracé de l'ellipse apparente laisse le calculateur satisfait, parfois il est obligé de faire passer l'ellipse en dehors des points observés. Au fond, l'opération repose sur le choix des foyers apparents, dont la position doit pouvoir, au besoin, être profondément modifiée. Le calculateur doit faire preuve d'imagination en cas de tracé rebelle à la loi des aires. Il arrive que l'ellipse suggérée par le semis de points observés soit grossièrement erronée.

Une fois obtenue l'orbite apparente, on repère soigneusement son centre C (fig. 4-VI), qui coïncide par définition avec celui de l'orbite réelle. L'axe CA est la projection du grand axe, il coupe l'ellipse en P, projection du périastre. L'excentricité se mesure alors immédiatement :

$$e = CA/CP$$

La date de passage au périastre s'obtient sans difficulté, soit en lisant sur la courbe $\theta(t)$ l'époque correspondant à la position de P, soit, ce qui est préférable, en utilisant de la façon suivante les observations sélectionnées pour obtenir la constante des aires. Prenons le cas de la figure (4-VI), on a les positions successives du compagnon B1, B2, P, B3. On a selon la loi des aires :

$$T = t_{B1} + \frac{\text{aire B1AP}}{c} = t_{B2} + \frac{\text{aire B2AP}}{c} \\ = t_{B3} - \frac{\text{aire B3AP}}{c} \quad (24, \text{VI})$$

Ces trois valeurs de T doivent être très voisines, on en prend la moyenne. On peut d'ailleurs prendre autant d'observations qu'on veut pour calculer T.

On a ainsi les éléments dynamiques à l'exception de a.

$$P, n = 360/P \text{ ou } \mu = 2\pi/P, T, e.$$

Restent à trouver les éléments du plan de l'orbite et le demi-grand axe. Les équations (18, VI) répondent à la question. A et B sont les coordonnées de P par rapport au centre C et se lisent sur le dessin où l'unité de longueur est la seconde d'arc. Pour trouver le diamètre conjugué à CP on trace des cordes parallèles à CP, dont les milieux définissent le lieu cherché. Soit R le point trouvé (fig. 4-VI). Ses coordonnées par rapport au centre se lisent sur le dessin :

$$\begin{cases} \xi_R = F_1 = F \cdot \cos \varphi \\ \eta_R = G_1 = G \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (25, \text{VI})$$

Les quatre constantes A, B, F, G étant obtenues, on utilise les formules de passage (14, VI) pour en déduire i, Ω, ω, a ainsi que les deux dernières constantes C et H servant au calcul des vitesses radiales. Il reste à comparer l'éphéméride donnée par les éléments avec les observations.

Méthode de Thiele-Innes-van den Bos. — Cette méthode utilise les propriétés de trois positions quelconques du satellite, elle se rapproche des principes appliqués pour le calcul des orbites des planètes; à ce point de vue elle a une grande valeur pédagogique.

Une fois construite l'ellipse apparente obéissant fidèlement à la loi des aires, on choisit, dans le sens des temps croissants, trois positions, appelées lieux moyens ou normaux, sur des portions d'ellipse particulièrement bien représentées par les observations. Soient :

$$\begin{cases} t_1 & \rho_1 & \theta_1 & x_1 = \rho_1 \cos \theta_1 & y_1 = \rho_1 \sin \theta_1 \\ t_2 & \rho_2 & \theta_2 & x_2 = \rho_2 \cos \theta_2 & y_2 = \rho_2 \sin \theta_2 \\ t_3 & \rho_3 & \theta_3 & x_3 = \rho_3 \cos \theta_3 & y_3 = \rho_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (26, \text{VI})$$

le tableau donnant les époques, les séparations, les angles de position et les coordonnées cartésiennes pour ces trois points. La constante des aires c est connue par le tracé de l'ellipse apparente. S étant la surface totale de l'ellipse, on a la période $P = S/c$. D'autre part, $\mu = 2\pi/P$ ou $n = 360/P$, respectivement en radians et degrés par an.

Considérons le triangle A12, on a (fig. 5-VI) :

$$S_{12} = \rho_1 \rho_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) = x_1 y_2 - x_2 y_1$$

ce qui donne par les $x = AX + FY$ et $y = BX + GY$.

$$S_{12} = (c/\mu)[\sin(u_2 - u_1) - \sin \Phi](\sin u_2 - \sin u_1) \quad (27, \text{VI})$$

Or d'après l'équation de Képler :

$$t_2 - t_1 = (1/\mu)[u_2 - u_1 - e(\sin u_2 - \sin u_1)]$$

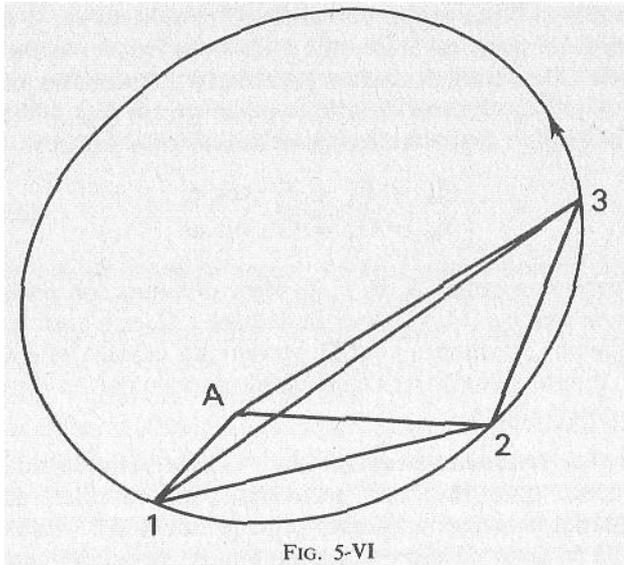


FIG. 5-VI

et, par des transformations simples :

$$t_2 - t_1 - s_{12}/c = (1/\mu)[u_2 - u_1 - \sin(u_2 - u_1)] \quad (28, VI)$$

C'est l'équation fondamentale de Thiele. Posons : $u_2 - u_1 = \alpha$, $u_3 - u_2 = \beta$, $u_3 - u_1 = \alpha + \beta$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha - \sin \alpha = \mu(t_2 - t_1) - 2\pi \frac{S_{12}}{S} \\ \beta - \sin \beta = \mu(t_3 - t_2) - 2\pi \frac{S_{32}}{S} \\ (\alpha + \beta) - \sin(\alpha + \beta) = \mu(t_3 - t_1) - 2\pi \frac{S_{31}}{S} \end{array} \right. \quad (29, VI)$$

Le second membre de ces équations est connu par le tracé de l'ellipse et les observations. Les deux premières équations donnent α et β , la troisième sert de contrôle. S'il y a divergence, le tracé de l'ellipse apparente est en cause, en ce cas il faut recommencer depuis le début.

De la relation (27, VI), on tire successivement :

$$S_{12} + S_{23} - S_{13} = (c/\mu)[\sin \alpha + \sin \beta - \sin(\alpha + \beta)] \quad (30, VI) \text{ puis,}$$

$$S_{23} \sin \alpha - S_{12} \sin \beta = (c/\mu) \cdot e \cdot [\sin \beta (\sin u_2 - \sin u_1) - \sin \alpha (\sin u_3 - \sin u_2)]$$

En écrivant $u_1 = u_2 - \alpha$ et $u_3 = u_2 + \beta$, cette dernière relation donne :

$$S_{23} \sin \alpha - S_{12} \sin \beta = (c/\mu) \cdot e \cdot \sin u_2 [\sin \alpha + \sin \beta - \sin(\alpha + \beta)] \quad (31, VI)$$

De la même façon on obtient :

$$S_{23} \cos \alpha + S_{12} \cos \beta - S_{13} = (c/\mu) \cdot e \cdot \cos u_2 [\sin \alpha + \sin \beta - \sin(\alpha + \beta)] \quad (32, VI)$$

Les équations (30, 31, 32, VI) donnent les deux relations fondamentales :

$$\left\{ \begin{array}{l} e \cdot \sin u_2 = \frac{S_{23} \sin \alpha - S_{12} \sin \beta}{S_{12} + S_{23} - S_{13}} \\ e \cdot \cos u_2 = \frac{S_{23} \cos \alpha + S_{12} \cos \beta - S_{13}}{S_{12} + S_{23} - S_{13}} \end{array} \right. \quad (33, VI)$$

Les seconds membres sont entièrement connus, d'où on tire e et u_2 , puis $u_1 = u_2 - \alpha$ et $u_3 = u_2 + \beta$, et on calcule :

$M_1 = u_1 - e \cdot \sin u_1$, M_2 et M_3 d'où l'époque de passage au périastre :

$$T = t_1 - M_1/n = t_2 - M_2/n = t_3 - M_3/n$$

Ces trois valeurs doivent être très voisines.

Cette première étape a fourni les éléments dynamiques : P , n , e , T .

Restent à calculer les constantes A , B , F , G . On a selon (12, VI) :

$$x_i = AX_i + FY_i \text{ et } y_i = BX_i + GY_i$$

$i = 1, 2, 3$. On a quatre inconnues pour six équations. On peut les traiter par les moindres carrés, ou encore calculer les inconnues par les positions 1 et 3 et utiliser 2 et 1 pour un contrôle.

Si les équations (33, VI) sont nulles, c'est que l'excentricité est nulle aussi, l'orbite réelle est une circonférence, il n'y a plus de périastre. Conventionnellement on prendra l'époque de passage au noeud pour origine. Si en plus l'inclinaison est nulle, il n'y a plus ni périastre, ni noeud, dans ce cas le satellite décrit une circonférence d'un mouvement uniforme.

Une fois obtenues les constantes A, B, F, G on passe aux éléments a, i, ω, Ω , par les formules (14, VI).

La méthode de Thiele-Innes-van den Bos satisfait l'esprit, mais pas toujours le calculateur. En effet le groupe d'équations (33, VI) comporte au second membre des différences aux numérateurs et aux dénominateurs, qui peuvent devenir évanouissants. Dans ce cas l'excentricité et l'anomalie u_2 sont mal connues. Il faut donc prendre dès le départ des secteurs adéquats. Tout repose sur les lieux normaux, dont le choix doit faire l'objet d'un flair éprouvé.

Application. — Nous choisissons l'étoile

$$\text{ADS 1227} = A \ 1913 \text{ mgn } 9,5-9,5 \quad \text{pos. } 1950 \ 1 \text{ h } 31 \text{ m } 6 + 34^\circ 24'$$

Cette étoile double découverte en 1908 n'a parcouru que cent vingt degrés depuis sa découverte. En 1975, une orbite est calculée par Erceg, sur un groupe d'observations arrêtées à 1961. Une mesure en 1976, à Nice, montre que cette orbite ne représente pas le mouvement actuel. C'est un bon cas d'application de la méthode de Thiele-Innes-van den Bos.

On commence par grouper les observations que voici :

| t | θ | ρ | Nomb. nuits | Obser. | Instrument | Ouv. cm |
|---------|----------|--------|-------------|----------------|-----------------|---------|
| 1908,87 | 267°,0 | 0",22 | 3n | Aitken | lun. Lick | 91 cm |
| 20,68 | 247,0 | ,22 | 5 | Aitken | lun. Lick | 91 |
| 30,29 | 237,5 | ,20 | 2 | van Biesbroeck | lun. Yerkes | 102 |
| 34,09 | 242,9 | ,23 | 2 | Aitken | lun. Lick | 91 |
| 48,78 | 205,8 | ,18 | 2 | van Biesbroeck | tel. Mc Donald | 210 |
| 58,66 | 182,3 | ,20 | 3 | van den Bos | tel. Mc Donald | 210 |
| 61,73 | 181,5 | ,18 | 2 | Couteau | lun. Yerkes | 102 |
| 65,051 | 173,6 | ,19 | 4 | Worley | lun. Washington | 66 |
| 65,794 | 170,0 | ,22 | 3 | Worley | tel. Flagstaff | 102 |
| 67,78 | 165,2 | ,17 | 3 | Couteau | lun. Nice | 50 |
| 69,74 | 157,7 | ,17 | 2 | Couteau | lun. Nice | 50 |
| 76,81 | 144,6 | ,20 | 1 | Couteau | lun. Nice | 74 |

Le nom des observateurs avec l'instrument utilisé, ainsi que le nombre de nuits, sont dûment notés. Ici les corrections de précession sont négligeables. On reporte ces mesures sur une feuille à dessin et on trace une ellipse, en prenant soin de respecter la loi des aires (fig. 6-VI).

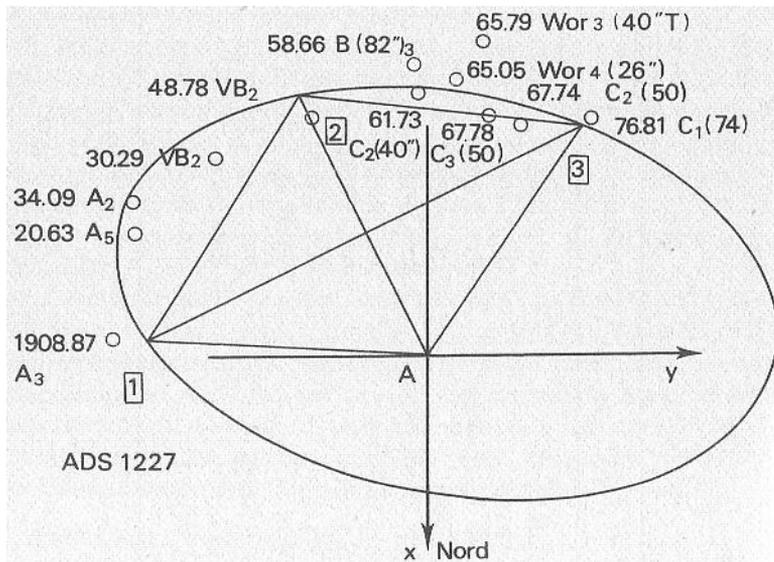


FIG. 6-VI. — Illustration de la méthode de Thiele-Innes-van den Bos.

C'est l'étoile double ADS 1227 = A 1913. On a porté les observations avec les époques, le nom abrégé de l'observateur, le nombre de nuits, l'ouverture de l'instrument en pouces (") ou en centimètres. L'ellipse apparente est tracée d'après le choix des trois lieux moyens.

Après quelques difficultés à représenter cette loi dans l'intervalle 1920-1948, on arrive à une ellipse qui donne le tableau suivant:

| t | Δt | Δs | $c = \Delta s / \Delta t$ | c |
|----------|------------|------------|---------------------------|--------|
| 1 908,87 | 11,81 | 0,212 | 0,0180 | |
| 20,68 | 28,10 | ,483 | 172 | 0,0174 |
| 48,78 | 19,00 | ,335 | 176 | |
| 67,78 | 9,03 | ,164 | 182 | |
| 76,81 | | | | 0,0178 |

Compte tenu de l'imprécision des observations et de leur rareté, on peut considérer ce tableau comme satisfaisant. On en déduit $c = 0,01757$. On mesure la surface S de l'ellipse, d'où la période $P = S/c = 2,7607/c = 157,1$.

On choisit les lieux moyens. On prend les observations extrêmes et celle de 1948.

$$\begin{cases} t_1 = 1\ 908,87 & \rho_1 = 0'',22 & \theta_1 = 267^\circ,0 \\ t_2 = 1\ 948,78 & \rho_2 = 0'',18 & \theta_2 = 205^\circ,8 \\ t_3 = 1\ 976,81 & \rho_3 = 0'',20 & \theta_3 = 144^\circ,6 \end{cases}$$

On trouve sur le dessin :

$$\begin{cases} 2\pi \cdot S_{12}/S = 1,04397 \\ 2\pi \cdot S_{32}/S = 1,01962 \\ 2\pi \cdot S_{31}/S = 0,97114 \end{cases}$$

ce qui conduit à :

$$\begin{cases} \alpha - \sin \alpha = 0,55203 \\ \beta - \sin \beta = 0,10130 \\ (\alpha + \beta) - \sin (\alpha + \beta) = 1,74578 \\ \alpha = 88^\circ,91 \\ \beta = 49^\circ,13 & \alpha + \beta = 138^\circ,04 \\ (\alpha + \beta) = 138^\circ,21 \end{cases}$$

On choisit :

$$\begin{cases} \alpha = 89^{\circ},0 = u_2 - u_1 \\ \beta = 49^{\circ},2 = u_3 - u_2 \\ \alpha + \beta = 138^{\circ},2 = u_3 - u_1 \end{cases}$$

On trouve ensuite :

$$\begin{cases} e \cdot \sin u_2 = + 0,20979 \\ e \cdot \cos u_2 = - 0,24825 \end{cases}$$

ce qui fournit : $u_2 = 139^{\circ},8$ $e = 0,32$, puis $u_1 = 50^{\circ},8$ $u_3 = 189^{\circ},0$. Ces trois valeurs de u permettent le calcul des anomalies moyennes :

$$\begin{cases} M_1 = u_1 - e \cdot \sin u_1 = 0,63862 \text{ rad.} \\ M_2 = & = 2,2342 \\ M_3 = & = 3,34673 \end{cases}$$

qui conduisent à l'époque de passage au périastre :

$$\begin{cases} T = t_1 - M_1/\mu = 1\ 892,90 \\ T = t_2 - M_2/\mu = 1\ 892,99 \\ T = t_3 - M_3/\mu = 1\ 893,07 \end{cases}$$

On arrondit à $T = 1\ 893,0$ ou $T + P = 2\ 050,1$. Restent à calculer les constantes A, B, F, G. On a :

$$\begin{cases} x_1 = - 0'',01005 & y_1 = - 0'',19174 \\ x_2 = - 0'',18006 & y_2 = - 0'',08705 \\ x_3 = - 0'',15677 & y_3 = + 0'',10734 \\ X_1 = + 0,31203 & Y_1 = + 0,73420 \\ X_2 = - 1,08380 & Y_2 = + 0,61151 \\ X_3 = - 1,30769 & Y_3 = - 0,14821 \end{cases}$$

La solution des équations :

$$x_i = AX_i + FY_i \quad y_i = BX_i + GY_i$$

pour $i = 1, 3$ et $i = 1, 2$ donne respectivement :

$$A = + 0'',1276 \quad A = + 0'',1276$$

$$B = - 0'',0551 \quad B = - 0'',0549$$

$$F = - 0'',0679 \quad F = - 0'',0683$$

$$G = - 0'',2377 \quad G = - 0'',2397$$

On adopte : $A = + 0'',1276$ $B = - 0'',0550$ $F = - 0'',0681$ $G = - 0'',2387$

qui donnent par (14, VI) les éléments de Campbell. Nous avons alors le jeu d'éléments suivant :

$$\begin{cases} P = 157,1 \text{ ans} \\ n = 2^{\circ}29'153 \\ T = 2\ 050,1 \\ a = 0'',25 \\ e = 0,32 \\ i = 123^{\circ},4 \\ \Omega = 77^{\circ},4 \\ \omega = 95^{\circ},9 \end{cases} \quad \begin{cases} A = + 0'',1276 \\ B = - 0'',0550 \\ F = - 0'',0681 \\ G = - 0'',2387 \end{cases}$$

Le tableau suivant donne les différences Observations - Calculs, désignées par (O - C), appelées «résidus». On y redonne les dates, les observations et le nom en abrégé des observateurs.

| t | θ | ρ | Obs. | O- C |
|---------|----------|--------|-------|---------------|
| 1908,87 | 267°,0 | 0",22 | 3n A | -0°,2 + 0",03 |
| 20,68 | 247,0 | ,22 | 5 A | -1,2 -,01 |
| 30,29 | 237,5 | ,20 | 2 VBs | +2,4 -,03 |
| 34,09 | 242,9 | ,23 | 2 A | + 13,2 ,00 |
| 48,78 | 205,8 | ,18 | 2 VBs | -0,1 -,02 |
| 58,66 | 182,3 | ,20 | 3 B | -3,5 +,02 |
| 61,73 | 181,5 | ,18 | 2 C | +2,5 ,00 |
| 65,051 | 173,6 | ,19 | 4 Wor | +2,2 +,01 |
| 65,794 | 170,0 | ,22 | 3 Wor | +0,2 +,04 |
| 67,78 | 165,2 | ,17 | 3 C | 0,0 -,01 |
| 69,74 | 157,7 | ,17 | 2 C | -3,1 -,01 |
| 76,81 | 144,6 | ,20 | 1 C | -0,9 +,01 |

A part la mesure de 1934, les observations sont correctement représentées. Ce calcul repose sur une portion d'orbite trop courte pour donner des éléments sûrs. C'est ce qu'on appelle une orbite préliminaire. L'éphéméride ci-contre permettra de vérifier, dans les années à venir, l'exactitude du résultat.

1 978,0 143°,1 0",19
80,0 139,1 ,20
82,0 135,3 ,20
84,0 131,7 ,20

Méthode des points opposés ou de Danjon. Elle est exposée en détail dans le Bulletin Astronomique, tome XI, 1938, puis dans les Annales de l'observatoire de Strasbourg, tome V, 1956.

C'est une méthode analytique, elle ne fait pas intervenir la construction de l'ellipse apparente, sauf dans certains cas pour avoir une valeur exacte de la période. Elle s'applique aux étoiles doubles ayant parcouru, de préférence, au moins une révolution; elle permet d'obtenir des éléments très sûrs, car toutes les observations concourent aux calculs qui fournissent à leur tour un contrôle strict des mesures. Cette méthode permet plusieurs applications successives, convergentes.

Le calculateur, à l'abri des surprises, est certain d'arriver finalement à un résultat très voisin de la vérité en fonction des mesures; il s'épargne ainsi des corrections différentielles d'éléments par des procédés parfois longs et hasardeux. La méthode des points opposés est récente. C'est la plus utilisée après celle de Thiele-Innes-van den Bos, qui demande un soin extrême, comme toutes les méthodes basées sur le tracé d'une trajectoire apparente.

On appelle points opposés des couples d'observations dont les angles de position diffèrent de 180°. Il en résulte que les anomalies vraies diffèrent aussi de 180°. C'est une propriété indépendante de l'inclinaison, comme la loi des aires, mais spécifique du mouvement képlérien, ce qui n'est pas le cas de la loi des aires.

La méthode comprend deux parties. D'abord le calcul des éléments dynamiques, puis celui des constantes de Thiele-Innes.

Pour tout couple de points opposés, l'équation fondamentale de Thiele (28, VI) se simplifie, car l'aire S_{12} est nulle, et on a :

$$M_2 - M_1 = u_2 - u_1 - \sin(u_2 - u_1) \quad (34, VI)$$

Or $v_2 - v_1 = 180^\circ$, $\theta_2 - \theta_1 = 180^\circ$, mais pas $(M_2 - M_1)$, ni $(u_2 - u_1)$. Posons :

$$M_2 - M_1 = 180^\circ - \Delta$$

ou

$$\Delta = 180^\circ - n(t_2 - t_1) \quad (35, VI)$$

Δ est appelé par Danjon angle caractéristique.

$$\text{On peut aussi écrire : } \Delta = (v_2 - M_2) - (v_1 - M_1) \quad (36, VI)$$

On voit que Δ est la différence algébrique des équations du centre aux deux points opposés. Cet angle s'annule au périastre et à l'apoastre. Il est négatif entre l'apoastre et le périastre, positif ailleurs.

Montrons que Δ est une fonction de M_1 (ou M_2) et de l'excentricité :

$$\text{tang } (v/2) = \sqrt{(1+e)/(1-e)} \cdot \text{tang } (u/2)$$

ce qui conduit pour deux points opposés à :

$$\text{tang } (u_2/2) = - (1 - e)/(1+e) \cdot \text{cotang } (u_1/2)$$

puis :

$$\text{tang } \frac{u_2 - u_1}{2} = - \frac{1 - e \cdot \cos u_1}{e \cdot \sin u_1} = - \frac{\sqrt{1 - e^2}}{e \cdot \sin v_1}$$

comme v_1 est fonction de M_1 (ou M_2) et de e , cela montre que Δ est bien fonction aussi de M_1 (ou M_2) et de e .

Des tables à double entrée donnant M en fonction de Δ et e ont été calculées par P. Muller. Ces tables, publiées dans les Annales de l'observatoire de Strasbourg, sont peu répandues en dehors des observatoires. Nous en donnons ici un extrait permettant d'appliquer la méthode, au prix d'interpolations aisées, grâce à des intervalles judicieusement choisis. Danjon qualifie de caractéristiques les courbes $\Delta(M)$ à e constant; il note que la valeur maximum de Δ a lieu pour $v_1 = 90^\circ$. Alors :

$$M_1 = \arccos e - e \cdot \sqrt{1 - e^2}$$

et

$$\Delta_{\max} = 180^\circ - 2 \cdot M_1$$

La table donne l'anomalie moyenne M en degrés pour chaque valeur de e et Δ . Elle s'arrête, pour chaque valeur de l'excentricité, au maximum de M . On en déduit les points situés au-delà du maximum par la symétrie :

$$M'_1 = 180^\circ - M_1 - \Delta$$

Ces quelques remarques permettent de résoudre la question. Supposons qu'on veuille calculer les éléments d'une binaire ayant effectué au moins une révolution observée. On détermine sa période, puis on trace la courbe $\theta(t)$ après avoir ramené toutes les observations à une même révolution. Cette courbe doit être tracée à grande échelle, Danjon recommande quelques centimètres par an et quelques millimètres en degrés, puis d'inscrire toutes les observations individuelles. La suite du calcul permettra d'apporter, si nécessaire, des corrections au tracé de cette courbe.

Annotons chaque couple de points opposés des indices 1 et 2, et formons un tableau d'une série de couples, par exemple $(0^\circ, 180^\circ)$, $(10^\circ, 190^\circ)$... $(170^\circ, 350^\circ)$, inscrivons les époques t_1, t_2 , puis $m_1 = nt_1$, $m_2 = nt_2$ et Δ . Le maximum de Δ donne une valeur approchée de e . On l'utilise pour avoir les M_1 à l'aide des tables, ce qui détermine T . En effet :

$$m_1 - M_1 = nt_1 - n(t_1 - T) = nT$$

Les différences $m_1 - M_1$ (ou $m_2 - M_2$) pour chaque couple de points doivent être constantes. Sinon il faut choisir par interpolation une excentricité légèrement différente, jusqu'à ce que le tableau des différences $m_1 - M_1$ ne présente pas d'écarts systématiques. Ce qui fournit à la fois e et T .

Ayant ainsi obtenu ces deux éléments, on calcule les

$$M_1 = m_1 - nT \text{ et } M_2 = m_2 - nT$$

d'où v_1 et v_2 par une table du mouvement képlérien. Les différences $v_2 - v_1$ doivent être proches de 180° , sinon il faut mettre en cause le tracé de la courbe $\theta(t)$. Les anomalies vraies ainsi obtenues s'appellent anomalies vraies observées, on les désigne par v_o .

EXTRAIT DES TABLES DE P. MULLER

| Δ | e | e | Δ | e | e | Δ | e | e | Δ | e | e | e |
|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|------|------|
| | 0,1 | 0,2 | | 0,3 | 0,4 | | 0,5 | 0,6 | | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2,03 | 0,80 | 3 | 1,23 | 0,67 | 4 | 0,50 | 0,27 | 10 | 0,32 | 0,13 | 0,03 |
| 2 | 4,06 | 1,60 | 6 | 2,46 | 1,35 | 8 | 1,00 | 0,53 | 20 | 0,65 | 0,26 | 0,06 |
| 3 | 6,10 | 2,40 | 9 | 3,69 | 2,03 | 12 | 1,51 | 0,80 | 30 | 0,98 | 0,38 | 0,08 |
| 4 | 8,15 | 3,21 | 12 | 4,94 | 2,71 | 16 | 2,02 | 1,07 | 40 | 1,33 | 0,52 | 0,11 |
| 5 | 10,22 | 4,01 | 15 | 6,21 | 3,40 | 20 | 2,53 | 1,35 | 50 | 1,69 | 0,65 | 0,15 |
| 6 | 12,32 | 4,82 | 18 | 7,50 | 4,10 | 24 | 3,05 | 1,62 | 60 | 2,07 | 0,80 | 0,18 |
| 7 | 14,45 | 5,63 | 21 | 8,81 | 4,81 | 28 | 3,58 | 1,90 | 70 | 2,49 | 0,95 | 0,21 |
| 8 | 16,62 | 6,45 | 24 | 10,16 | 5,53 | 32 | 4,12 | 2,19 | 80 | 2,96 | 1,12 | 0,25 |
| 9 | 18,84 | 7,27 | 27 | 11,55 | 6,26 | 36 | 4,68 | 2,47 | 90 | 3,49 | 1,31 | 0,29 |
| 10 | 21,11 | 8,09 | 30 | 12,98 | 7,00 | 40 | 5,25 | 2,77 | 100 | 4,09 | 1,52 | 0,33 |
| 11 | 23,44 | 8,93 | 33 | 14,47 | 7,64 | 44 | 5,84 | 3,07 | 105 | 4,45 | 1,64 | 0,36 |
| 12 | 25,85 | 9,76 | 36 | 16,04 | 8,55 | 48 | 6,44 | 3,38 | 110 | 4,85 | 1,77 | 0,38 |
| 13 | 28,35 | 10,61 | 39 | 17,67 | 9,35 | 52 | 7,08 | 3,71 | 115 | 5,30 | 1,92 | 0,41 |
| 14 | 30,96 | 11,46 | 42 | 19,40 | 10,19 | 56 | 7,74 | 4,04 | 120 | 5,82 | 2,08 | 0,44 |
| 15 | 33,70 | 12,33 | 45 | 21,26 | 11,05 | 60 | 8,44 | 4,38 | 125 | 6,46 | 2,26 | 0,47 |
| 16 | 36,61 | 13,20 | 48 | 23,29 | 11,95 | 64 | 9,17 | 4,74 | 130 | 7,24 | 2,47 | 0,51 |
| 17 | 39,73 | 14,08 | 51 | 25,48 | 12,89 | 68 | 9,95 | 5,11 | 132 | 7,63 | 2,56 | 0,52 |
| 18 | 43,11 | 14,98 | 54 | 27,96 | 13,87 | 72 | 10,79 | 5,50 | 134 | 8,05 | 2,66 | 0,55 |
| 19 | 46,86 | 15,88 | 56 | 29,80 | 14,57 | 76 | 11,70 | 5,91 | 136 | 8,56 | 2,77 | 0,57 |
| 20 | 51,14 | 16,81 | 58 | 31,84 | 15,28 | 80 | 12,69 | 6,35 | 138 | 9,15 | 2,89 | 0,59 |
| 21 | 56,28 | 17,74 | 60 | 34,17 | 16,03 | 84 | 13,80 | 6,82 | 140 | 9,88 | 3,02 | 0,60 |
| 22 | 63,18 | 18,70 | 61 | 35,46 | 16,41 | 88 | 15,03 | 7,32 | 142 | 10,84 | 3,16 | 0,62 |
| 23 | | 19,67 | 62 | 36,89 | 16,81 | 92 | 16,46 | 7,87 | 143 | 11,46 | 3,24 | 0,64 |
| 24 | | 20,66 | 63 | 38,48 | 17,22 | 96 | 18,16 | 8,47 | 144 | 12,24 | 3,32 | 0,65 |
| 25 | | 21,68 | 64 | 40,30 | 17,63 | 100 | 20,29 | 9,14 | 145 | 13,34 | 3,41 | 0,66 |
| 26 | | 22,71 | 65 | 42,40 | 18,06 | 102 | 21,60 | 9,50 | 146 | 15,62 | 3,50 | 0,68 |
| 27 | | 23,78 | 66 | 45,04 | 18,50 | 104 | 23,18 | 9,89 | 148 | | 3,70 | 0,71 |
| 28 | | 24,87 | 67 | 48,87 | 18,95 | 105 | 24,12 | 10,09 | 150 | | 3,94 | 0,73 |
| 29 | | 26,00 | 68 | | 19,42 | 106 | 25,21 | 10,30 | 152 | | 4,23 | 0,77 |
| 30 | | 27,16 | 70 | | 20,40 | 107 | 26,51 | 10,52 | 154 | | 4,58 | 0,81 |
| 31 | | 28,36 | 72 | | 21,46 | 108 | 28,25 | 10,75 | 155 | | 4,79 | 0,83 |
| 32 | | 29,61 | 74 | | 22,60 | 109 | 30,68 | 10,99 | 156 | | 5,04 | 0,85 |
| 33 | | 30,90 | 76 | | 23,86 | 110 | | 11,23 | 157 | | 5,33 | 0,88 |
| 34 | | 32,26 | 78 | | 25,25 | 112 | | 11,76 | 158 | | 5,69 | 0,90 |
| 35 | | 33,68 | 80 | | 26,82 | 114 | | 12,35 | 159 | | 6,14 | 0,93 |
| 36 | | 35,17 | 81 | | 27,69 | 116 | | 13,00 | 160 | | 6,80 | 0,96 |
| 37 | | 36,76 | 82 | | 28,64 | 118 | | 13,74 | 161 | | 8,06 | 0,99 |
| 38 | | 38,45 | 83 | | 29,67 | 120 | | 14,60 | 163 | | | 1,07 |
| 39 | | 40,28 | 84 | | 30,82 | 122 | | 15,64 | 165 | | | 1,16 |
| 40 | | 42,27 | 85 | | 32,13 | 123 | | 16,23 | 167 | | | 1,29 |
| 41 | | 44,47 | 86 | | 33,64 | 124 | | 16,92 | 169 | | | 1,46 |
| 42 | | 46,97 | 87 | | 35,49 | 125 | | 17,71 | 170 | | | 1,60 |
| 43 | | 49,91 | 88 | | 37,95 | 126 | | 18,67 | 171 | | | 1,78 |
| 44 | | 53,58 | 89 | | 42,47 | 127 | | 19,90 | 172 | | | 2,05 |
| 45 | | 59,04 | 90 | | | 128 | | 21,71 | 173 | | | 2,64 |

Nous allons maintenant leur comparer les anomalies vraies v_c calculées par des équations de condition. Pour cela Danjon tire des relations (6, 11 et 12, VI) :

puis il élimine a , ρ et r et trouve :

$$\text{tang } \theta = \frac{B + G \cdot \text{tang } v}{A + F \cdot \text{tang } v} \quad (37, \text{VI})$$

En utilisant les couples (v_o, θ) , on peut écrire autant d'équations de ce type que de points choisis, mais elles ne peuvent permettre la connaissance que de trois constantes en fonction de l'autre. Danjon pose : $A = \alpha F$, $B = \beta F$, $G = \gamma F$ et l'équation devient :

$$\text{tang } \theta = \frac{\beta + \gamma \cdot \text{tang } v}{\alpha + \text{tang } v} \quad (38, \text{VI})$$

et trouve α , β , γ par la méthode des moindres carrés. Mais P. J. Morel a montré que le choix du diviseur de (37, VI) ne doit pas être indifférent. Il est préférable de choisir la constante la plus forte comme diviseur. Comme elles sont inconnues au départ, le choix à priori est aléatoire, il convient surtout d'éviter celle qui s'avérerait très inférieure aux autres, quitte à reprendre la solution des équations (38, VI) après un premier essai.

Les constantes α , β , γ , fournissent à leur tour les anomalies vraies calculées v_c par (38, VI). Des anomalies v_c on remonte aux anomalies moyennes calculées M_c . On forme les écarts $(v_o - v_c)$, puis $(M_c - M) = \delta M$ qui, transformés en temps, donnent :

$$\delta t = (1/n) \delta M$$

ce sont les corrections qu'il convient d'apporter à la courbe $\theta(t)$.

Il se peut que les δt ne soient pas significatifs et ne changent pas l'allure de la courbe, ils donnent un contrôle. S'ils s'avéraient trop importants, il y aurait lieu d'en tenir compte pour tracer une nouvelle courbe $\theta(t)$ en seconde approximation et recommencer tout le calcul depuis le début. En général cette deuxième approximation est largement suffisante.

On reprend les équations (38, VI) à l'aide des constantes trouvées, pour calculer les angles de position aux époques d'observation. L'allure des résidus renseigne sur la qualité des éléments.

Reste à déterminer la dernière constante. Nous procédons ainsi. Les trois constantes de Thiele-Innes en fonction de la quatrième permettent le calcul des éléments géométriques i , Ω , ω , par les trois premières relations (14, VI). On calcule alors les séparations en supposant le demi-grand axe égal à l'unité et on forme le diagramme $(\rho c/a, \rho o)$. Les points représentatifs se répartissent près d'une droite de pente a . Ainsi tous les éléments sont connus.

Remarquons qu'il suffit d'une seule observation de la séparation pour connaître le demi-grand axe. Ainsi le grand avantage de la méthode de Danjon est de déterminer les éléments à l'aide seulement des angles de position, beaucoup mieux mesurés que les séparations qui ne servent qu'à donner l'échelle de l'orbite, et encore les meilleures d'entre elles, parmi les plus grandes, suffisent-elles.

Application

ADS 10786 = AC 7 mgn 10,5-11,0
pos. 1950 17 h 44 m 5 + 27°45'

L'orbite de cette étoile double a été calculée par l'auteur en 1959. Les éléments représentent bien les observations ultérieures. Nous reproduisons la marche suivie dans le calcul.

Ce couple de naines rouges termine sa troisième révolution depuis sa découverte en 1856 par Alvan Clark. Bien que d'éclat très faible, il a été régulièrement suivi et la première orbite a été calculée dès 1878. La méthode des points opposés est particulièrement indiquée ici, car le faible éclat du couple rend les mesures de séparation difficiles et imprécises, tandis que l'écartement relativement grand des composantes permet des mesures assez sûres en angle de position.

On trouvera un extrait des mesures en fin d'application.

Après avoir déterminé la période de 43,20 ans, nous avons ramené toutes les observations à l'équinoxe 1950 et à une même révolution puis tracé la courbe $\theta(t)$ à l'échelle de 5 mm par degré et de 5 cm par an. Puis pour les 36 angles de position de dix en dix degrés, on a calculé l'angle caractéristique :

$$\Delta = (v_2 - M_2) - (v_1 - M_1) = 180^\circ - n(t_2 - t_1)$$

t_1 et t_2 étant les époques de passage à deux points opposés. L'origine des époques est 1889,0. On forme

le tableau donnant l'angle de position de dix en dix degrés de 0 à 170°, les époques t1 et t2 correspondant à θ et $\theta + 180^\circ$, les anomalies $nt_1 = m_1$ et $nt_2 = m_2$, puis l'angle caractéristique. Cette colonne et celle des t2 montrent

$$\begin{cases} a \cdot \rho \cdot \cos \theta = r \cdot (A \cdot \cos v + F \cdot \sin v) \\ a \cdot \rho \cdot \sin \theta = r \cdot (B \cdot \cos v + G \cdot \sin v) \end{cases}$$

que le périastre est compris entre les époques 31,68 et 33,43. D'autre part le maximum de Δ montre que l'excentricité est voisine de 0,18. On trouve donc pour $e = 0,18$ et $0,19$ les valeurs M tirées des tables de Muller, puis les différences $m_2 - M = mo$. Elles sont nettement systématiques pour 0,19.

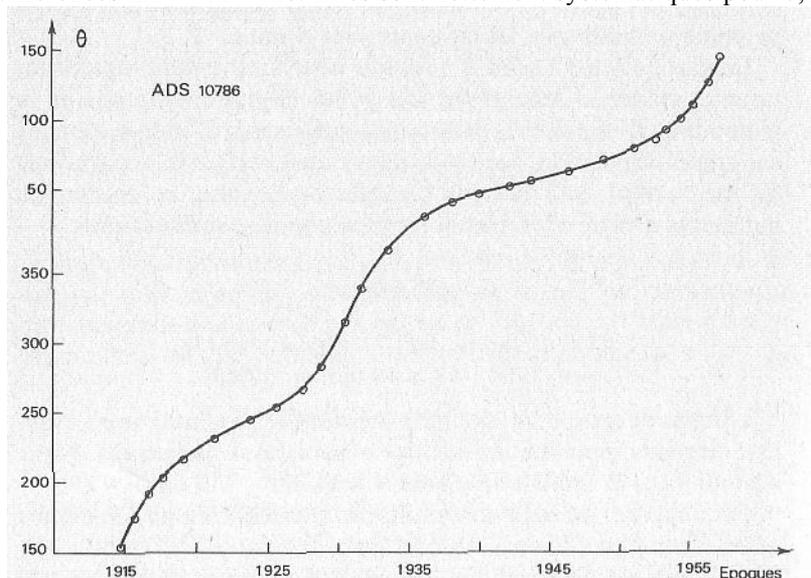


Fig. 7-VI. — ADS 10786. Courbe $\theta(t)$ de l'étoile satellite par rapport à la principale.

Les cercles représentent quelques observations de 1915 à 1960. Le graphique de travail à l'échelle de 5 mm par degré et de 5 cm par an occupe 2 m x 1m,80. Les parties à forte pente correspondent aux époques de faible séparation.

On prend pour mo une valeur moyenne provisoire de $276^\circ,3$ et on choisit $e = 0,18$. On calcule les $M_{1,2} = m_{1,2} - 276,3$ pour les 36 valeurs de θ . Ce sont les anomalies moyennes observées. On en déduit les anomalies vraies observées à l'aide d'une table du mouvement képlérien. On constate que les différences ($v_2 - v_1 - 180^\circ$), qui sont nulles théoriquement, restent faibles; les deux tiers sont inférieures à un degré. A l'aide des résidus les plus importants, on corrige les anomalies $M_{1,2}$ correspondantes, qui donnent à leur tour une amélioration de mo qui devient $276^\circ,66$ (d'où $T = 1922,20$) et de e qui s'ajuste à $0,178$. La table du mouvement képlérien redonne alors les anomalies vraies observées vo qu'on trouvera dans le tableau ci-contre.

Ceci fait, on peut écrire les 36 équations (38, VI), en utilisant les θ et vo du tableau. Comme on a de petits résidus, on additionne les équations trois par trois avant de les résoudre par la méthode des moindres carrés. On pourrait même se contenter de les additionner douze par douze, ce qui donnerait un résultat plus rapide et presque identique. Ces équations fournissent pour les constantes les valeurs suivantes :

$$\alpha = -1,749 \quad \beta = -2,831 \quad \gamma = -0,957$$

Les anomalies vraies vc calculées à l'aide de ces constantes sont réunies dans le tableau; on y donne les différences $vo - vc$. Ces différences sont petites, elles apportent aux époques t1 et t2 des corrections faibles de l'ordre de quelques centièmes d'années. On a vérifié que les corrections ainsi introduites dans la courbe $\theta(t)$ n'en modifient pas sensiblement le tracé, sauf peut-être vers l'angle de position 250° , mais la courbe tend à se rapprocher davantage des observations.

| | | | | | | e=0,18 | | e=0,19 | |
|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|----------------|---------|----------------|
| θ | t1 | t2 | ml | m2 | | M | m _o | M | m _o |
| 0° | 0a,64 | 26a,88 | 5°3 | 224°,0 | - 38°,7 | - 51°,8 | 275°,8 | - 44°,8 | 268°,8 |
| 10 | 1,43 | 27,44 | 11,9 | 228,7 | - 36,8 | - 46,0 | 274,7 | - 40,6 | 269,3 |
| 20 | 2,41 | 28,15 | 20,1 | 234,6 | - 34,5 | - 40,7 | 275,3 | - 36,4 | 271,0 |
| 30 | 3,67 | 29,07 | 30,6 | 242,2 | - 31,6 | - 35,3 | 277,5 | - 32,0 | 274,2 |
| 40 | 5,53 | 30,20 | 46,1 | 251,7 | - 25,6 | - 26,6 | 278,3 | - 24,8 | 276,9 |
| 50 | 8,54 | 31,68 | 71,2 | 264,0 | - 12,8 | - 12,2 | 276,2 | - 11,3 | 275,3 |
| 60 | 12,43 | 33,43 | 103,6 | 278,7 | +4,9 | +4,6 | 274,1 | +4,9 | 273,0 |
| 70 | 16,18 | 35,54 | 134,8 | 296,2 | 18,6 | 18,3 | 277,9 | 1,8 | 279,4 |
| 80 | 19,12 | 37,22 | 159,3 | 310,2 | 29,1 | 31,4 | 278,8 | 27,5 | 283,5 |
| 90 | 21,07 | 38,50 | 175,6 | 320,8 | 34,8 | 41,3 | 279,5 | 36,3 | 284,9 |
| 100 | 22,39 | 39,39 | 186,6 | 328,2 | 38,4 | 50,8 | 277,4 | | |
| 110 | 23,28 | 40,14 | 194,0 | 334,5 | 39,5 | 55,2 | 279,3 | | |
| 120 | 24,00 | 40,79 | 200,0 | 339,9 | 40,1 | | | | |
| 130 | 24,58 | 41,24 | 204,8 | 343,7 | 41,1 | | | | |
| 140 | 25,09 | 41,72 | 209,1 | 347,7 | 41,4 | | | | |
| 150 | 25,49 | 42,23 | 212,4 | 351,9 | 40,5 | | | | |
| 160 | 25,88 | 42,73 | 215,7 | 356,1 | 39,6 | 84,8 | 271,3 | | |
| 170 | 26,35 | 0,07 | 219,6 | 0,6 | 39,0 | 88,1 | 272,5 | | |
| θ | vo | vc | vo - vc | θ | vo | | vc | v0 - v, | |
| 0° | - 71°,4 | - 71°,3 | - 00,1 | 180° | 108°,6 | | 108°,7 | - 00,1 | |
| 10 | - 65,7 | - 65,8 | + 0,1 | 190 | 114,6 | | 114,2 | + 0,4 | |
| 20 | - 58,4 | - 58,9 | + 0,5 | 200 | 121,8 | | 121,1 | + 0,7 | |
| 30 | - 48,6 | - 49,9 | + 1,3 | 210 | 130,7 | | 130,1 | + 0,6 | |
| 40 | - 36,0 | - 37,2 | + 1,2 | 220 | 142,9 | | 142,8 | + 0,1 | |
| 50 | - 18,6 | - 19,2 | + 0,6 | 230 | 161,6 | | 161,4 | + 0,2 | |
| 60 | +2,7 | +4,2 | - 1,5 | 240 | - 175,2 | | - 175,8 | + 0,6 | |
| 70 | 27,8 | 28,1 | - 0,3 | 250 | - 152,6 | | - 151,9 | - 0,7 | |
| 80 | 47,0 | 46,9 | + 0,1 | 260 | - 133,6 | | - 133,1 | - 0,5 | |
| 90 | 60,5 | 60,2 | + 0,3 | 270 | - 120,1 | | - 119,8 | - 0,3 | |
| 100 | 69,5 | 69,7 | - 0,2 | 280 | - 110,2 | | - 110,3 | + 0,1 | |
| 110 | 76,9 | 76,8 | + 0,1 | 290 | - 103,3 | | - 103,2 | - 0,1 | |
| 120 | 82,9 | 82,5 | + 0,4 | 300 | -97,4 | | -97,5 | + 0,1 | |
| 130 | 87,0 | 87,3 | - 0,3 | 310 | -92,5 | | -92,7 | + 0,2 | |
| 140 | 91,2 | 91,6 | - 0,4 | 320 | -88,0 | | -88,4 | + 0,4 | |
| 150 | 95,5 | 95,6 | - 0,1 | 330 | -84,5 | | -84,4 | + 0,1 | |
| 160 | 99,7 | 99,7 | 0,0 | 340 | -80,8 | | -80,3 | - 0,5 | |
| 170 | 104,0 | 104,0 | 0,0 | 350 | -76,5 | | -76,0 | - 0,5 | |

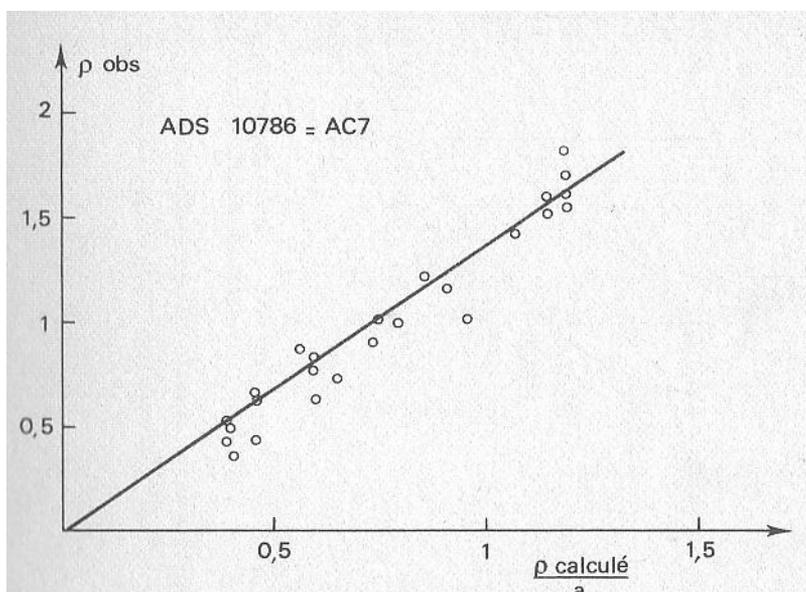


FIG. 8-VI. — ADS 10786. Mesure du grand axe.

En abscisse on porte les valeurs calculées $\rho c/a$, en ordonnées les observations ρ_0 . Les points se répartissent au voisinage d'une droite dont la pente donne le demi-grand axe. Quelques observations seulement sont représentées.

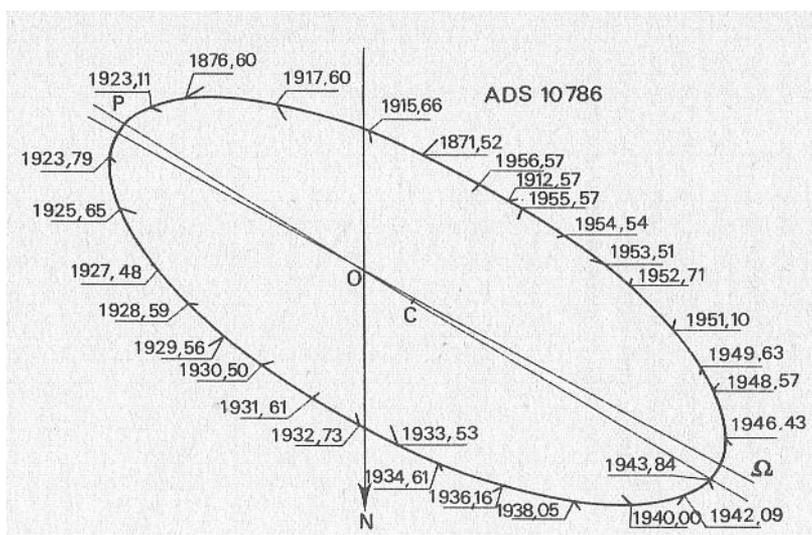


FIG. 9-VI. — Orbite apparente de ADS 10786 = AC7. Quelques observations seulement sont représentées.

L'étoile principale est en O. L'élongation maximum du compagnon en 1944 et 1987 est de 1,65". Ne pas oublier qu'une seconde est l'angle sous-tendu par 1 cm vu à 2 km. Les segments représentent les écarts entre l'observation et le calcul.

Les éléments géométriques sont alors obtenus par les formules classiques :

$$i = 66^{\circ},2 \quad \Omega = 60^{\circ},7 \quad \omega = 174^{\circ},0$$

Il reste à déterminer le grand axe. Les mesures étant assez dispersées et les observations faites avec des instruments d'ouvertures très diverses, il faut rechercher s'il n'existe pas d'écarts systématiques d'un observateur à l'autre ou chez un même individu en fonction de la séparation.

On a construit avec l'ensemble des observations le diagramme $(\rho c/a, \rho_0)$. Les mesures se situent autour d'une droite coupant l'axe des $\rho c/a$ très au-dessous de l'origine. Contrairement à ce qui a lieu en général pour les couples de grand éclat, les observateurs ont mesuré trop serré le couple lorsque l'écartement des composantes était petit, ce qui aurait pu être évité en calculant les éléments à partir de l'ellipse apparente. Finalement, en nous appuyant sur des mesures faites aux époques de grande séparation, nous avons retenu comme demi-grand axe $a = 1",360$, ce qui a permis le calcul des constantes A, B, F, G. On remarque que le diviseur choisi F n'est pas le plus petit des quatre.

| ÉLÉMENTS | | | | | |
|---------------|------------|---------------|--------|-------|-------|
| P = 43,20 ans | a = 1",360 | A = - 0",7118 | | | |
| n = 8°,3333.. | i = 66°,2 | B = - 1,1522 | | | |
| T = 1965,40 | Ω = 60°,7 | F = + 0,4070 | | | |
| e = 0,178 | ω = 174°.0 | G = - 0,3895 | | | |
| ÉPHÉMÉRIDE | | | | | |
| 1976,5 | 6°,6 | 0",68 | 1980,5 | 38°,2 | 1",15 |
| 7,5 | 18,1 | 0,79 | 1,5 | 42,4 | 1,26 |
| 8,5 | 26,8 | 0,92 | 2,5 | 46,0 | 1,36 |
| 9,5 | 33,2 | 1,04 | 3,5 | 49,1 | 1,44 |

On trouve ci-dessous une série d'observations et leurs résidus avec l'orbite. Pour ne pas alourdir le texte, nous n'avons pas mis toutes les mesures. Nous indiquons seulement le nombre de nuits dans les cas où les moyennes groupent plus de deux observateurs.

| | Observations | | | | Résidus |
|---------|--------------|-------|------|-------------------------|----------------|
| 1857,50 | 59°,2 | 1",82 | 2 n | Dawes | + 00,4 + 0",22 |
| 65,79 | 84,1 | 1,17 | 7 n | Dembowski 5,0. Struve 2 | - 0,2 +,06 |
| 78,08 | 233,5 | 1,03 | 13 n | | - 0,2 -,05 |
| 85,56 | 286,7 | 0,67 | 5 n | H. Struve 2, Hall 3 | + 1,8 ,00 |
| 94,74 | 41,4 | 1,23 | 30 n | | + 0,3 +,01 |
| 1902,94 | 63,6 | 1,63 | 32 n | | - 0,3 +,05 |
| 06,28 | 73,0 | 1,37 | 18n | | 0,0 -,02 |
| 08,46 | 80,1 | 1,22 | 22 n | | - 1,0 +,05 |
| 11,59 | 102,4 | 0,72 | 8 n | | + 0,3 -,05 |
| 15,66 | 175,4 | 0,49 | 7 n | | - 0,5 -,06 |
| 21,11 | 233,0 | 1,00 | 14n | | + 0,4 -,07 |
| 28,59 | 283,3 | 0,66 | 3 n | Aitken | + 1,0 -,03 |
| 33,53 | 8,7 | 0,64 | 7 n | | - 0,6 -,06 |
| 40,00 | 47,6 | 1,37 | 36 n | | - 0,3 -,05 |
| 46,43 | 63,7 | 1,60 | 26 n | | - 0,6 +,03 |
| 51,10 | 79,5 | 1,26 | 8 n | Baize 4, Baize 4 | + 1,1 +,03 |
| 54,54 | 99,9 | 0,77 | 7 n | Couteau 3, Bz 4 | + 0,4 -,03 |
| 56,57 | 126,8 | 0,55 | 9 n | Worley 4, Bz 5 | + 0,1 -,03 |
| 60,65 | 204,0 | 0,70 | 4n | Worley | + 2,8 +,10 |
| 64,68 | 234,2 | 1,07 | 4n | Baize | 0,0 -,01 |
| 74,54 | 330,8 | 0,51 | 7 n | | - 1,2 -,02 |

Corrections différentielles des éléments. — Un calcul bien conduit doit fournir d'emblée des résidus acceptables. Dans le cas contraire il est vain d'espérer une amélioration totalement satisfaisante. Il se peut que des observations soient systématiquement erronées, ou qu'un troisième corps inobservable perturbe le mouvement du couple. L'allure et l'importance des écarts dépendent de la difficulté de la binaire. Une erreur de dix degrés sur un couple serré à 0",2 est moins importante qu'un écart de deux degrés sur Castor ou γ Vierge. C'est une des raisons pour lesquelles les calculs d'orbites ne devraient être entrepris que par des observateurs réguliers, connaissant bien les difficultés des mesures.

Ce sont les écarts en θ qui sont significatifs et peuvent, sous certaines conditions, être traités comme différentiels; les écarts en séparation peuvent être systématiques sans être significatifs et peuvent rarement être traités comme différentiels. On a :

$\theta = f(\Omega, i, \omega, e, T, n)$ la différentielle totale s'écrit :

$$d\theta = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i \quad (39, VI)$$

x_i étant un des six éléments, ce qui donne :

$$\theta_0 - \theta_c = A.d\Omega + B.di + C.d\omega + D.de + E.dT + F.dn$$

On calcule aisément les A ... F à l'aide des relations (4 et 9, VI). On trouve :

$$\begin{cases} A = 1 \\ B = -\sin i \cdot \tan(v + \omega) \cdot \cos^2(\theta - \Omega) \\ C = \cos^2(\theta - \Omega) \cdot \sec^2(v + \omega) \cdot \cos i \\ D = C \cdot \frac{2 - e \cdot \cos u - e^2}{(1 - e \cdot \cos u)^2} \sin u \\ E = C \cdot \frac{\sqrt{1 - e^2}}{(1 - e \cdot \cos u)^2} \\ F = E \cdot (t - T) \end{cases}$$

Chaque observation donne une équation (39, VI). On résout l'ensemble par la méthode des moindres carrés. C'est un procédé lourd et, à la vérité, peu employé. Il est plus rapide de corriger les éléments par des considérations pratiques sur l'allure des résidus.

Ainsi un changement sur Ω change de la même façon tous les angles de position. Il est commode d'écrire :

$$dM = (t - T)dn - ndT$$

On peut alors agir sur n et T pour améliorer deux régions des résidus. Si l'excentricité est forte, un changement en T sera plus important que si elle est faible.

Calcul des masses d'étoiles

Par application de la troisième loi de Képler, on a immédiatement la masse du système par :

$$MA + MB = \frac{a'^3}{p^3 P^2} \quad (40, VI)$$

où MA et MB sont les masses des composantes, celle du Soleil étant prise pour unité, p la parallaxe trigonométrique en secondes de degré, a' le demi-grand axe apparent exprimé dans la même unité, P la période en années.

On obtient ainsi des masses fondamentales, déterminées uniquement par la mesure de positions. C'est la connaissance des parallaxes qui limite les progrès, car leur petitesse ne permet pas d'envisager une amélioration de leur mesure sans une révolution profonde de nos techniques. On rappelle que la parallaxe est l'angle sous lequel on voit, de l'étoile, l'unité astronomique ou distance moyenne de la Terre au Soleil. Par contre les grands axes et les périodes sont mieux connus avec le temps, par accumulation des observations. C'est ainsi que sur 750 orbites connues, moins d'une cinquantaine ont une parallaxe assez bien mesurée, pour donner une bonne détermination des masses.

Ces résultats permettent de constater que les étoiles ont des masses voisines qui s'échelonnent de 0,07 à 20 soleils. Les neuf dixièmes des étoiles ont une masse comprise entre 0,4 et 2, le Soleil occupe le milieu de l'échelle.

La relation (40, VI) donne accès à la masse totale du système, mais non aux masses individuelles. Leur connaissance exige celle du mouvement des composantes autour du centre de gravité du système. Ce n'est plus un travail d'observation visuelle, mais spectrographique ou photographique. Pour être complet on ne peut laisser dans l'ombre un problème aussi important, nous en étudions l'essentiel.

Rapport des masses par les vitesses radiales. — On peut déterminer les masses d'un couple en mesurant à plusieurs époques la vitesse radiale de chaque composante.

Nous suivons la terminologie de W. H. van den Bos (Astronomical Techniques, 1963). Soient VA et VB les vitesses radiales des composantes A et B et VG celle du centre des masses. Posons :

$$VR = VB - VA \quad \beta = MB/MA$$

$$k.p = \beta/(1 + \beta) \quad l.p = 1/(1 + \beta)$$

p étant la parallaxe. k et l sont des constantes.

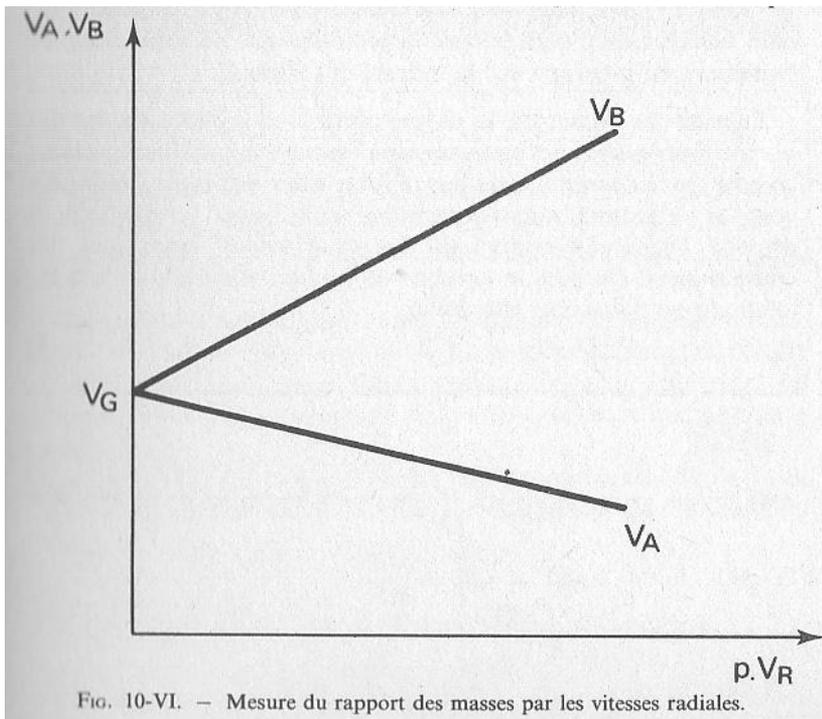
Supposons VR positif pour fixer les idées. Cela veut dire que la composante A s'éloigne. On a donc :

$$V_A = V_G - k \cdot p \cdot V_R ; V_B = V_G + l \cdot p \cdot V_R \quad (41, VI)$$

Or $p \cdot V_R$ est connu en fonction du temps et des éléments de l'orbite par (15 et 16, VI).

On mesure, à des époques différentes, les vitesses radiales et on porte sur un diagramme $p \cdot V_R$ en abscisse, puis V_A et V_B en ordonnées. D'après (41, VI) on trouve deux segments de droites qui se coupent pour $p \cdot V_R = 0$ en un point d'ordonnée V_G . On a donc la vitesse du centre des masses. Les pentes des segments V_A et V_B sont de sens contraires, leur mesure donne k et l , d'où le rapport des masses et la parallaxe :

$$M_B/M_A = k/l ; p = 1/(k + l) \quad (42, VI)$$



Si la parallaxe trigonométrique est déjà connue par l'astrométrie, on dispose d'un contrôle du calcul de l'orbite.

Si on ne peut mesurer indépendamment V_A et V_B mais seulement V_R , on obtient la parallaxe absolue et la somme des masses, mais on ne peut accéder aux masses individuelles.

Le calcul des masses stellaires par la mesure des vitesses radiales est limité par la précision des spectrographes. Les segments de droites de la figure 10-VI sont d'autant plus courts que la variation des vitesses est plus faible, leurs pentes ne sont pas toujours aisées à obtenir. Enfin la méthode ne peut s'appliquer qu'à des binaires bien séparées, au moins deux secondes et assez lumineuses, par exemple pas plus faible que la magnitude 6. Il en résulte que l'application ne concerne que quelques rares couples comme γ Virg., α Cent., 70 Oph., ζ UMa. Toutefois les techniques modernes de spectrographie électronique permettront d'accroître les performances en lumière et en précision sur la mesure des vitesses.

Rapport des masses par la photographie. — La photographie des étoiles doubles avec des instruments à longue distance focale permet le repérage des composantes par rapport à des étoiles apparemment voisines. L'accumulation des clichés suffit, dans certains cas, à démêler l'écheveau compliqué des mouvements apparents des composantes. De plus le nombre de couples justiciables de cette méthode est beaucoup plus élevé.

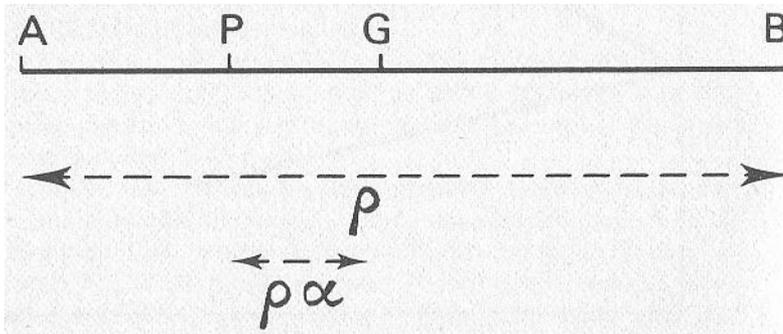


Fig. 11-VI. — Rapport des masses par la position du photocentre.

Généralement, sur une plaque, les composantes d'une étoile double sont séparées si leur distance est supérieure à $1''{,}5$. En deçà, les images photographiques, très supérieures en dimension aux disques d'Airy, empiètent l'une sur l'autre. Le maximum d'intensité photographique, ou photocentre, ne correspond ni à la position de la primaire, ni à celle de la secondaire. Soient (fig. 11-VI) A et B les positions des composantes, G celle du centre des masses et P celle du photocentre. Ces quatre points sont alignés. Certains auteurs, comme P. van de Kamp, déterminent la position du photocentre par la condition :

$$\frac{AP}{AB} = \gamma = \frac{I_B}{I_A + I_B} = 1/(1 + 10^{0,4\Delta m}) \quad (43, VI)$$

où I_A et I_B sont les luminosités des composantes et Δm leur différence de magnitude.

L'équation (43, VI) n'est pas rigoureuse. Différents auteurs l'ont discutée, comme P. J. Morel (1969) qui a ébauché une théorie de la diffusion de la lumière dans une plaque photographique. Le problème est d'importance, car il est une des clefs de voûte de nos connaissances des masses stellaires. Les résultats de l'équation (43, VI) et celui de P. J. Morel sont donnés dans le tableau ci-contre.

| Δm | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| γ (van de K) | 0,5 | 0,387 | 0,285 | 0,137 | 0,060 | 0,025 | 0,01 |
| γ (Morel) | 0,5 | 0,386 | 0,284 | 0,125 | 0,05 | 0,01 | 0 |

Ils diffèrent notablement pour les grandes différences d'éclat. Mais il convient d'ajouter qu'à de grandes différences d'éclat correspondent des étoiles dissemblables, de types différents, qui n'impressionnent pas la plaque de la même façon, ce qui modifie la fonction γ .

Au cours du mouvement orbital, le photocentre du couple décrit une orbite homothétique de celle du compagnon avec un rapport d'axes :

$$PG/AB = \alpha/a \quad (44, VI)$$

Or, si on écrit avec P. van de Kamp le rapport de masses :

$$R = AG/AB = MB/(MA + MB) \quad (45, VI)$$

On en déduit :

$$R = \alpha/a + \gamma \quad (46, VI)$$

La mesure des rapports de masses de composantes, non séparées photographiquement, repose donc sur la mesure de α et des hypothèses faites sur la fonction γ .

Ceci posé, considérons un cliché d'une étoile double. Deux cas sont à étudier : les composantes sont séparées ou non.

Dans le premier cas, écrivons les coordonnées cartésiennes X et Y de la composante A, orientées dans le sens croissant des ascensions droites et déclinaisons :

$$\begin{cases} X = c_\alpha + \mu_\alpha(t - t_0) + p \cdot P_\alpha + a_\alpha \cdot R \cdot Q_\alpha \\ Y = c_\delta + \mu_\delta(t - t_0) + p \cdot P_\delta + a_\delta \cdot R \cdot Q_\delta \end{cases} \quad (47, VI)$$

où

c_α et c_δ sont les positions héliocentriques à l'époque origine

to, $\mu\alpha$, et $\mu\delta$ sont les mouvements propres annuels projetés sur les axes,

t l'époque de la prise du cliché,

$P\alpha$, $P\delta$ les facteurs parallactiques, ou projections de la grandeur de la parallaxe sur les axes,

$a\alpha$, $a\delta$ les projections du demi-grand axe,

$Q\alpha$, $Q\delta$ les projections du mouvement orbital à l'époque t.

Les positions héliocentriques, les mouvements propres et la parallaxe sont des constantes. Il n'en est pas de même des facteurs parallactiques, ni du mouvement orbital.

Nous renvoyons aux traités spécialisés pour l'étude détaillée des facteurs parallactiques. On donne simplement ici les formules permettant de les calculer.

$$\begin{cases} P_\alpha = r(f \cdot \sin \odot + g \cdot \cos \odot) \\ P_\delta = r(f' \cdot \sin \odot + g' \cdot \cos \odot) \end{cases} \quad (48, VI)$$

où r est le rayon vecteur de l'orbite terrestre exprimé en unités astronomiques et donné par les annuaires, \odot la longitude vraie du soleil donnée aussi par les annuaires, et :

$$\begin{cases} f = + 0,9174 \cdot \cos \alpha \\ g = - \sin \alpha \\ f' = + 0,3979 \cdot \cos \delta - 0,9174 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \\ g' = - \cos \alpha \cdot \sin \delta \end{cases}$$

Dans ces constantes, intervient l'obliquité de l'écliptique, qui varie lentement. Les formules ci-contre sont données pour l'an 2000.

Les facteurs $Q\alpha$ et $Q\delta$ sont donnés par :

$$\begin{cases} Q_\alpha = \frac{1}{a} (AX + FY) \\ Q_\delta = \frac{1}{a} (BX + GY) \end{cases}$$

Attention, X et Y, dans ces équations, sont les coordonnées réduites au sens défini par (6, VI)!

L'orbite visuelle du couple étant connu, les équations (47, VI) renferment chacune quatre inconnues : les positions héliocentriques, les projections du mouvement propre, la parallaxe et le rapport des masses.

Dans le cas où les composantes ont des images non séparées sur le cliché, on ne peut suivre que le mouvement du photocentre. Le dernier terme des deuxièmes membres de (47, VI) devient :

$$\begin{cases} \alpha \cdot Q_\alpha = (R - \gamma)Q_\alpha \\ \alpha \cdot Q_\delta = (R - \gamma)Q_\delta \end{cases} \quad (49, VI)$$

Dans ce cas, le facteur γ enlève le caractère fondamental à la mesure du rapport des masses, puisqu'on fait des hypothèses photométriques. D'où l'importance attachée à l'étude de cette fonction, encore insuffisamment connue.

Chaque observation fournit une équation (47, VI). Mais il faut ramener chaque plaque aux mêmes conditions, sinon les effets cherchés, si petits, ne dépassant pas deux ou trois microns, seront noyés dans les erreurs accidentelles. Ces causes d'erreurs sont nombreuses, citons-en quelques-unes : la réfraction, l'écart de la plaque au foyer, la non-perpendicularité du plan de la plaque sur l'axe optique, la dilatation due aux différences de température. On ne cherche pas à éliminer ces erreurs, mais à ramener toutes les plaques aux conditions de l'une d'elles, de façon à ce que les résultats soient comparables.

On choisit, au voisinage de l'astre à étudier, quelques étoiles assez faibles, pour former un groupe de base sur lequel s'appuieront les mesures. Soient $X_{c,i}$, $Y_{c,i}$ les coordonnées du groupe de base dans la plaque étalon. Il faut ramener toutes les plaques à celle-là.

Appelons x_i , y_i les coordonnées de base dans une plaque quelconque, on les ramène à la plaque étalon en écrivant :

$$\begin{cases} X_{c,i} = A_0 + A_1 \cdot x_i + A_2 \cdot y_i \\ Y_{c,i} = B_0 + B_1 \cdot x_i + B_2 \cdot y_i \end{cases} \quad (50, VI)$$

On se limite au premier ordre, car le champ est petit, quelques minutes de degré, les effets de déformation sont linéaires à un très haut degré d'approximation. On calcule les A, B, pour chaque plaque, par la méthode des moindres carrés et on réintroduit ces constantes dans les seconds membres de (50, VI) pour obtenir des coordonnées X_i, Y_i ramenées à la plaque étalon.

Les différences : $(X_{c,i} - X_i)$ et $(Y_{c,i} - Y_i)$

doivent être négligeables et aléatoires. Sinon c'est qu'une ou plusieurs étoiles du groupe de base ont un mouvement propre ou une parallaxe appréciables, ce qui fausse les résultats. D'autre part l'étoile à étudier donne pour chaque plaque :

$$\begin{cases} X_0 = A_0 + A_1 \cdot x_0 + A_2 \cdot Y_0 \\ Y_0 = B_0 + B_1 \cdot x_0 + B_2 \cdot y_0 \end{cases} \quad (51, VI)$$

Ainsi les coordonnées de l'étoile étudiée sont ramenées à la plaque étalon. Il est commode de se limiter à trois étoiles de repère, à condition qu'on se soit assuré de leur fixité absolue.

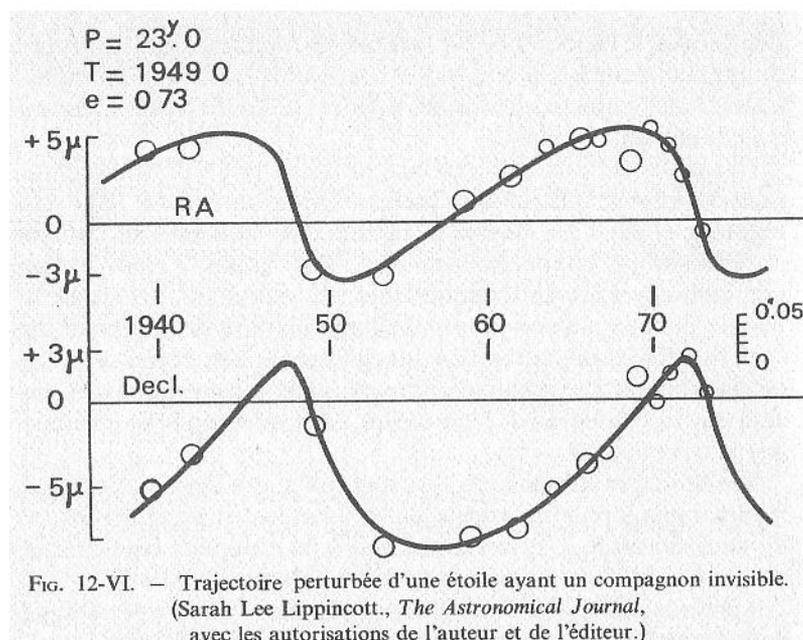


FIG. 12-VI. — Trajectoire perturbée d'une étoile ayant un compagnon invisible. (Sarah Lee Lippincott., *The Astronomical Journal*, avec les autorisations de l'auteur et de l'éditeur.)

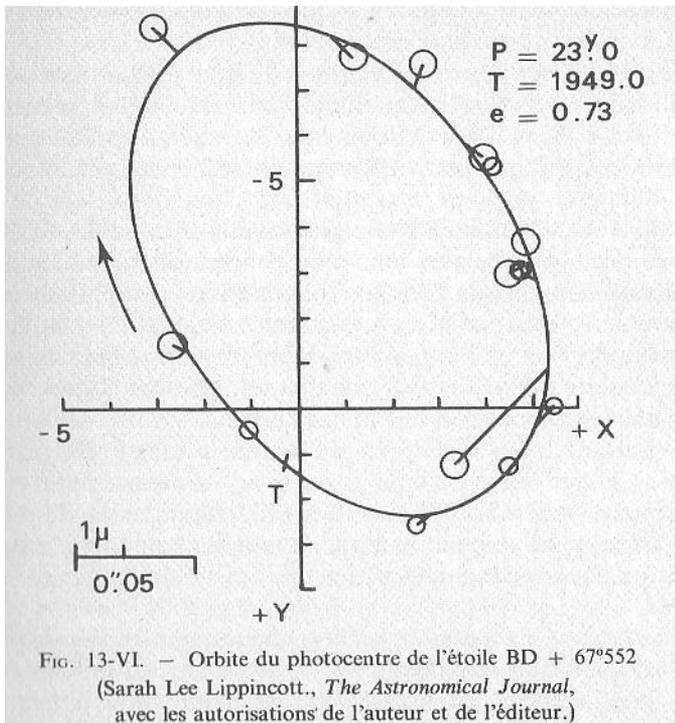
C'est l'étoile BD + 67°552. Les mouvements en ascension droite (R.A.) et en déclinaison ne sont pas rectilignes, mais festonnés par la présence d'un compagnon invisible. Les écarts atteignent 5 microns au foyer de la lunette de Sproul. La dimension des cercles représentant les erreurs probables d'observation. La tache photographique mesure déjà une centaine de microns.

Certains astronomes, comme P. van de Kamp, utilisent une méthode de réduction, dite méthode des dépendances, faisant intervenir des poids en fonction de la distance de l'étoile à étudier aux étoiles de comparaison.

Les coordonnées fournies par les équations (51, VI), pour chaque époque d'observation, servent à former les relations (47, VI). Les quatre inconnues sont déterminées en résolvant ces équations par la méthode des moindres carrés. La solution fournit les trois paramètres :

- le mouvement propre,
- la parallaxe,
- le rapport des masses.

Un tel travail d'observation est long, il s'étale sur des dizaines d'années pour chaque étoile double. L'observatoire Sproul, près de Philadelphie, et la station de Flagstaff de l'US Naval Observatory, sont spécialisés dans ces mesures de masses et de parallaxes. Sous l'autorité de P. van de Kamp, de S. L. Lippincott, et de K. Aa. Strand, on y accumule des dizaines de milliers de clichés d'étoiles proches. Des milliers de parallaxes ont été ainsi calculées. Ajoutons que la méthode peut servir à étudier des orbites de binaires non résolues, parce que trop serrées ou trop faibles d'éclat. Ces travaux ont aussi abouti à la découverte des premières planètes hors du système solaire.



L'analyse de la trajectoire de la figure 12-VI conduit à l'orbite ci-dessus. La trajectoire n'atteint pas dix microns au foyer de la lunette de Sproul. La masse du corps perturbateur est le tiers de celle du Soleil. C'est une petite étoile invisible.

Pour être plus complet, il convient de donner, avant le tableau des masses les mieux connues, quelques indications astrophysiques sur la classification stellaire.

Non seulement les étoiles diffèrent en volume et en masse, mais aussi en température, en composition chimique, en propriétés physiques. Les astronomes classent les étoiles, comme un herboriste les plantes. Un classement est un tri qui sert à dégager des lois, lesquelles à leur tour permettent d'expliquer le comportement de la nature. La classification des étoiles fait l'objet de gros traités spécialisés. Comme le lecteur n'est pas forcément familiarisé avec ce sujet, nous en donnons le strict essentiel.

Les étoiles ont des couleurs propres, liées à l'intensité de leur température superficielle. Une simple paire de jumelles les met bien en évidence. Ainsi Véga et Sirius sont blanches, Capella est jaune, comme le Soleil, Antarès et Bételgeuse sont franchement rouges. Ces différentes couleurs suggèrent une classification que le père Secchi s'avisa d'établir en 1868, en répartissant les étoiles en quatre classes des plus chaudes aux plus froides. Plus tard en 1890, Pickering-Flemming, à la suite d'observations spectrales précises, utilisent les premières lettres majuscules pour classer les étoiles des plus chaudes aux plus froides. Au début du siècle Miss Cannon, à l'observatoire de Harvard, établit les grandes lignes de la classification encore en usage de nos jours.

En partant des plus chaudes, on associe la suite O, B, A, F, G, K., M. Chaque lettre caractérise un type, lui-même divisé en dix sous-types. Ainsi le Soleil est une étoile G2, Sirius une étoile A1. On a pu associer des mesures précises de température de surface à ces types qui vont de vingt mille degrés pour les B0 à trois mille pour les M4.

À une même température ou type correspondent des astres de volumes différents. Par exemple le Soleil et Capella sont de même type, mais Capella est un système de deux astres à peu près identiques, chacun mille fois plus gros que le Soleil, bien que la masse totale n'excède pas cinq fois celle de notre grand luminaire. Ce sont des étoiles géantes, caractérisées par une faible gravité superficielle et de faibles pressions. On introduit ainsi un nouveau paramètre la pression, qui détermine la dimension de l'étoile. Ce nouveau paramètre définit ce qu'on appelle la Classe spectrale. Elle est notée par des chiffres romains, I désignant les étoiles supergéantes très lumineuses, VI désignant les sous-naines. Le Soleil appartient à la classe V, la plus nombreuse, appelée Série principale. Sa classification complète est donc G2V. Capella est formée de deux étoiles géantes G5III et G0III.

Toutes les étoiles entrent dans cette classification, à l'exception des étoiles denses en fin d'évolution, comme les naines blanches et les étoiles à neutrons ou pulsars. Ces astres sont d'ailleurs difficiles à

observer, on en connaît assez peu.

Le tableau suivant donne une liste de quarante-huit couples dont la somme des masses est digne de confiance.

Le tableau des masses donne en première ligne :

- le numéro du catalogue d'Aitken (ADS), ou bien la référence à un autre catalogue,
- le nom de l'astre comme étoile double,
- éventuellement sa dénomination dans la constellation,
- les magnitudes extraites du catalogue de W. S. Finsen et C. E. Worley (1970),
- les types et classes spectraux extraits du catalogue de W. Gliese (1969),
- la parallaxe trigonométrique extraite du même catalogue, sauf indication contraire,
- la masse du système en Soleils, calculée selon la troisième loi de Képler,
- le rapport de masses MB/(MA + MB) extrait de Empirical data on stellar masses, luminosities and radii, par D. L. Harris III, K. Aa. Strand et C. E. Worley (Basic Astronomical Data, 1963), sauf indications contraires.

en deuxième ligne :

- les coordonnées célestes pour 1950 en heures, minutes et dixièmes de minute, puis en degrés et minutes de degré,
- l'auteur du calcul de l'orbite et l'année du calcul; les données sont extraites du fichier de l'Observatoire de Nice,
- la période en années,
- le demi-grand axe apparent en secondes de degré,
- un renvoi éventuel à des notes.

TABLEAU DES MASSES

| ADS | Nom | Auteur orbite | Magnitude | Spectre | p. tri. | $\Sigma M\odot$ | R |
|---------------------|-----------------------|----------------|--|-----------|-----------------------|-------------------------|------------|
| $\alpha 1950\delta$ | | | | P ans | a" | | |
| 48 AB 00028 | $\text{O}\Sigma$ N | 547 4532 | U. Guntzel-Lingner (1954) | 8,9-9,0 | dK6-dMO 362,3 | 0",094 2,16 6,179 | 0,5 N |
| 61 00035 | Σ N | 3062 5809 | P. Blaize (1957) | 6,4-7,2 | dG4-dG8 106,83 | ,045 2,82 1,432 | 0,59 N |
| 520 00347 | β S | 395 2502 | W. H. van den Bos (1936) | 6,3-6,4 | G5V 25,00 | ,70 1,40 0,670 | 0,5 |
| 671 00461 | Σ N | 60 5733 | η Cass. K. Aa. Strand (1969) | 3,5-7,5 | GOIV-MOV 480 | ,174 1,42 11,9939 | 0,39 N |
| - 30°529 01327 | δ S | 31 AB 3010 | N. Wieth-Knudsen (1954) | 7,8-7,9 | K3V 4,5587 | ,057 1,29 0,1708 | 0,5 |
| 01364 | L S | 726-8 1813 | C. E. Worley et A. L. Behall (1973) | 12,5-12,9 | M5,5-M5,5 26,52 | ,384 0,22 2,06 | 0,45 N |
| 1865 02251 | A N | 2329 0412 | W. H. van den Bos (1962) | 9,3-9,5 | M1,5 25,25 | ,066 0,86 0,5405 | 0,54 N |
| - 12°501 02371 | ϵ S | 312 1205 | Ceti W. S. Finsen (1970) | 5,6-5,6 | F8V 2,667 | ,069 0,54 0,108 | 0,5 |
| 2402 03099 | h S | 3555 2911 | α For. W. H. van den Bos (1956) | 3,9-6,5 | F8IV 154,5 | ,74 2,03 2,700 | - |
| 3841 05130 | N | 4557 | Capella P. W. Merrill (1921) | 0,6-1,1 | G5III-GOIII 0,2848 | ,075 4,50 0,05360 | - |
| 31°2902 05585 | Hu S | 1399AB 3102 | P. Baize (1951) | 8,4-8,9 | K5V 72,0 | 0,49 1,36 - 0,94 | |
| 06283 | Ross S | 614 0246 | S. L. Lippincott (1955) | 10,9-14,4 | M7V 16,6 | 14,248 0,18 0,904 | 0,351 N |
| 5423 06429 | AGC S | 1 1639 | Sirius W. H. van den Bos (1960) | 1,5-8,5 | AIV-n.b. 50,09 | ,377 3,14 7,500 | 0,33 |
| 6251 07368 | Shaeb. N | 0522 | Procyon K. Aa. Strand (1949) | 0,4-10,3 | F5IV-n.b. 40,65 | ,285 2,46 4,548 | 0,27 |
| 6420 07495 | β S | 101 1346 | ρ Puppis G. Douglass (non publiée) | 5,6-6,2 | GIV 23,26 | ,062 1,81 0,616 | 0,53 N |
| 7114 08558 | Hu N | 628 BC 4814 | O. J. Eggen (1962) | 10,8-11,0 | M1V 39,69 | ,066 0,69 0,68 | 0,5 |
| +42°1956 08576 | Kui N | 37 4200 | 10 U.Ma. P. Baize (1967) | 4,1-6,2 | F5V 21,81 | 0,64 2,10 0,640 | 0,427 N |
| +15°2003 09096 | N | 347 1512 | 81 CnC W. S. Finsen (1966) | 7,2-7,2 | KOV 2,65 | ,064 1,08 0,1258 | 0,5 |

| | | | | | | | | |
|---------------|-----|-------|--|-----------|----------|--------|------|-------|
| 7284 | Σ | 3121 | W. H. van den Bos (1937) | 7,9-8,0 | K3V | 1,26 | 0,51 | |
| 09149 | N | 2847 | | | 34,20 | 0,660 | | |
| -39°3651 | | | ψ Vel. | 4,1-4,6 | F2IV | ,065 | 2,44 | 0,49 |
| 09287 | S | 4015 | W. H. van den Bos (1945) | | 34,11 | 0,920 | | |
| 8630 | Σ | 1670 | γ Virg. | 3,5-3,5 | FOV-FOV | ,099 | 1,84 | 0,49 |
| 12391 | S | 0111 | K. Aa. Strand (1935) | | 171,37 | 3,746 | | |
| 8804 | Σ | 1728 | α Comae | 5,1-5,1 | F5V | ,053 | 2,91 | 0,51 |
| 13076 | N | 1747 | H. Haffner (1938) | | 25,87 | 0,662 | | |
| 8862 | Hu | 644 | P. Baize (1969) | 9,2-10,0 | dM2 | ,119 | 0,73 | 0,412 |
| 13176 | N | 4802 | | | 49,18 | 1,44 | | N |
| 9031 | Σ | 1785 | K. Aa. Strand (1953) | 7,6-8,0 | K6V-K6V | ,086 | 0,93 | 0,49 |
| 13468 | N | 2714 | | | 155,0 | 2,423 | | |
| -60°5483 | | | α Cent. | 0-1,2 | G2V-KOV | ,743 | 2,07 | 0,46 |
| 14362 | S | 6038 | W. D. Heintz (1959) | | 79,92 | 17,583 | | |
| 9413 | Σ | 1888 | ξ Boot. | 4,7-6,9 | G8V-K4V | ,148 | 1,59 | 0,46 |
| 14491 | N | 1919 | R. Wielen (1962) | | 151,505 | 4,9044 | | N |
| 9617 | Σ | 1937 | η Cor. | 5,6-5,9 | G2V-G2V | ,060 | 1,58 | 0,497 |
| 15211 | N | 3028 | A. Danjon (1938) | | 41,56 | 0,839 | | N |
| 9716 | 0Σ | 298 | P. Couteau (1965) | 7,5-7,6 | K4V | ,041 | 2,25 | 0,478 |
| 15343 | N | 3958 | | | 55,88 | 0,785 | | |
| 10075 | Σ | 2052 | L. Siegrist (1950) | 7,7-7,8 | K2V | ,058 | 1,02 | 0,5 |
| 16267 | N | 1831 | | | 236,07 | 2,2337 | | |
| 10157 | Σ | 2084 | ζ Herc. | 2,9-5,5 | GOIV-KOV | ,104 | 1,86 | 0,41 |
| 16394 | N | 3142 | P. Baize (1975) | | 34,49 | 1,355 | | N |
| -8°4352 Kui | | 75 | J. Voûte (1945) | 9,8-9,8 | M4V-M4V | ,161 | 0,84 | 0,5 |
| 16528 | S | 0814 | | | 1,71504 | 0,218 | | |
| 10374 | β | 1118 | η Oph. | 3,0-3,5 | A2,5V | ,051 | 1,25 | - |
| 17075 | S | 1540 | G. F. G. Knipe (1959) | | 84,31 | 1,057 | | |
| +45°2505 Kui | | 79 | P. Baize (1952) | 10,0-10,4 | M3V-M3V | ,155 | 0,57 | 0,50 |
| 17106 | N | 4547 | | | 12,98 | 0,71 | | |
| -34°11626 Mlb | | 0 | R. Wielen (1962) | 6,1-7,6 | K3V-K5V | ,140 | 1,07 | 0,41 |
| 17156 | S | 3456 | | | 42,177 | 1,7338 | | |
| 10585 | A | 351 | P. Baize (1954) | 9,6-10,0 | dMO | ,055 | 0,36 | - |
| 17274 | N | 2926 | | | 60,0 | 0,60 | | |
| 10598 | Σ | 2173 | R. L. Duncombe | 6,0-6,1 | G8IV | ,060 | 2,31 | 0,486 |
| 17278 | S | 0101 | et J. Ashbrook (1951) | | 46,08 | 1,02 | | N |
| 10660 | β | 962 | 26 Drac. | 5,3-7,9 | GOV | ,073 | 1,60 | 0,37 |
| 17345 | N | 6155 | P. Baize (1965) | | 76,00 | 1,52 | | N |
| 10786 | AC | 7 | P. Couteau (1958) | 10,3-10,8 | dM4-dM4 | ,124 | 0,71 | - |
| 17445 | N | 2545 | | | 43,20 | 1,360 | | |
| 11046 | Σ | 2272 | 70 Oph. | 4,2-6,0 | KOV-K5V | ,195 | 1,64 | 0,42 |
| 18029 | N | 0232 | R. Wielen (1962) | | 87,892 | 4,5482 | | N |
| 11077 | AC | 15 | 99 Herc. | 5,1-8,5 | F7V-K5V | ,061 | 1,41 | 0,37 |
| 18051 | N | 3033 | W. D. Heintz (1970) | | 55,8 | 1,00 | | |
| 11871 | β | 648 | G. V. Schrutka- | 5,4-7,5 | G0V | ,054 | 3,23 | 0,43 |
| 18552 | N | 3250 | Rechtenstamm (1934) | | 61,203 | 1,24 | | |
| 12889 | Σ | 2576 | P. Baize (1954) | 8,3-8,4 | dK5-dK5 | ,047 | 1,61 | 0,5 |
| 19436 | N | 3330 | | | 243,55 | 2,15 | | |
| +4°4510 Kui | | 99 | P. Baize (1969) | 8,4-9,1 | K5V | ,062 | 1,39 | 0,489 |
| 20370 | N | 0447 | | | 42,35 | 0,84 | | N |
| 14773 | 0Σ | 535 | δ Equil. | 5,2-5,3 | F8V-F8V | ,055 | 3,25 | 0,49 |
| 21120 | N | 0948 | W. J. Luyten et E. G. Ebbighausen (1934) | | 5,70 | 0,26 | | |
| 14787 | AGC | 13 | τ Cygni | 3,8-6,4 | FOIV | ,054 | 1,74 | 0,43 |
| 21128 | N | 3749 | W. D. Heintz (1970) | | 49,9 | 0,88 | | N |
| 58°7893 | | φ 283 | W. H. van den Bos (1949) | 9,4-9,5 | K7V | ,052 | 2,27 | 0,5 |
| 21430 | S | 5755 | | | 6,32 | 0,2335 | | |
| 15972 | Krü | 60 | S. L. Lippincott (1952) | 9,8-11,5 | dM3-dM4 | ,253 | 0,44 | 0,38 |
| 22263 | N | 5727 | | | 44,6 | 2,412 | | |
| 17175 | β | 733 | 85 Peg. | 5,8-8,9 | G3V | ,084 | 1,26 | 0,48 |
| 23595 | N | 2649 | R. Wielen (1962) | | 26,386 | 0,8032 | | |

Notes

- ADS 48. La présence d'un troisième corps est probable selon P. Baize, avec une période de 7,3 ans. (Comm. Colloque de Coïmbre 1974.)
- ADS 61. Le rapport de masses indique la présence d'un troisième corps B'. Les masses sont, d'après P. Baize, $m_A = 0,9$ $m_B = 0,7$ $m_{B'} = 0,7$. Le couple BB' aurait une période de 6.9 ans. (Comm. Colloque de Coïmbre 1974.)
- ADS 671. Parallaxe et rapport de masses de K. Aa. Strand. (A.J. 74, n° 6, p. 760, 1969.) P. Baize soupçonne la présence de deux satellites invisibles de périodes respectives 40 et 8,7 ans. (Comm. Colloque de Coïmbre 1974.)
- L 726-8. Données de C. E. Worley et A. L. Behall. (A.J. 78, n° 7, p. 650, 1973.)
- ADS 1865. Parallaxe et rapport de masses de J. F. Wanner. (A.J. 74, n° 2, p. 229, 1969.)
- Ross 614. Nouvelle étude complète par S. L. Lippincott et J. L. Hershey. (A.J. 77, n° 8. p. 679, 1972.)
- ADS 6420. Parallaxe et rapport de masses de L. A. Breakiron et G. Gatewood. (A.J. 80, n° 4, p. 318, 1975.)
- +42°1956. Nouvelle étude complète par L. A. Breakiron et G. Gatewood. (A.J. 80, n° 9, p. 714, 1975.) Mais nous conservons l'orbite de P. Baize bien suivie par les observations.
- ADS 8862. Parallaxe et rapport de masses de W. D. Heintz. (A.J. 74, n° 6, p. 768, 1969.)
- ADS 9413. K. Aa. Strand signale une perturbation de 2,2 ans de période, non confirmée par P. Baize qui la trouve de 10,2 ans. Un troisième corps de faible masse est donc probable. (Comm. Colloque de Coïmbre 1974.)
- ADS 9617. Nouvelle étude par L. A. Breakiron, J. P. Dabrowski et G. Gatewood. (A.J. 80, n° 9, p. 174, 1975.) Mais nous conservons l'orbite de A. Danjon bien suivie par les observations. P. Baize soupçonne un troisième corps sous une période voisine de 8 ans. (Comm. Colloque de Coïmbre, 1974.)
- ADS 10157 La primaire est double astrométrique selon P. Baize, avec une période de 10,5 ans et un demi-grand axe de 0",12. La masse du compagnon invisible est 0.2. (Comm. Colloque de Coïmbre, 1974.)
- ADS 10598. A. H. Batten, J. M. Fletcher et F. R. West trouvent, par l'observation des vitesses radiales, une parallaxe de 0",060. (P.A.S.P. 83, p. 149, 1971.)
- ADS 10660. Parallaxe et rapport de masses de P. van de Kamp et S. L. Lippincott. (A.J. 81, n° 9, p. 775, 1976.)
- ADS 11046. Troisième corps soupçonné mais non confirmé.
- +4°4510. Rapport de masses de P. J. Morel. (A.J. 74, n° 2, p. 245, 1969.)
- ADS 14787. Parallaxe et rapport de masses de W. D. Heintz. (A.J. 75, n° 7, p. 848, 1970.)

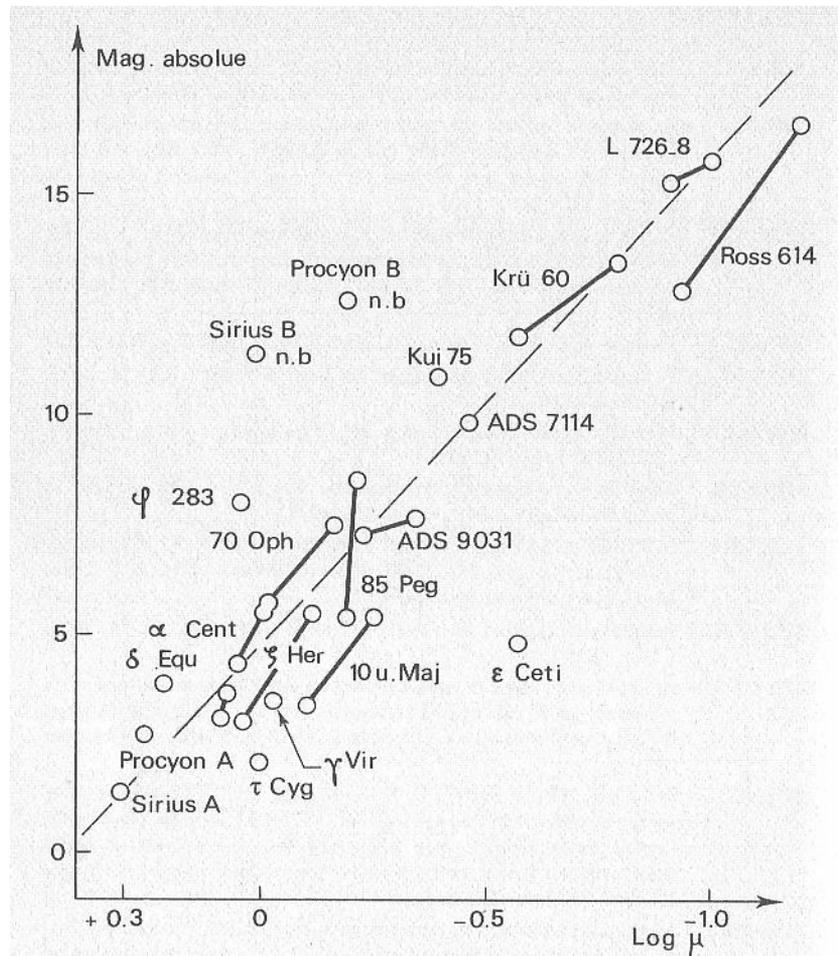


FIG. 14-VI. On a limité le nombre d'étoiles pour ne pas surcharger le diagramme. Les couples sont reliés par un trait. La ligne en pointillés est tracée d'après la relation de Baize-Romani. Les abscisses donnent le logarithme de la masse en soleils.

Il est instructif de porter sur un diagramme les masses en abscisses et les magnitudes absolues en ordonnées (fig. 14-VI). On constate que les masses d'un système sont, en général, aux extrémités d'un segment dont la pente est très voisine pour l'ensemble des couples. Ce diagramme suggère que les masses et la luminosité ne sont pas indépendantes. Sur la figure (14-VI) on a indiqué cette droite en pointillés, elle illustre la relation Masse-Luminosité trouvée mathématiquement par A. S. Eddington en 1916.

Un certain nombre d'étoiles et de couples s'écartent notablement de cette loi. Quelques-unes ont une masse trop forte par rapport à leur éclat. C'est le cas des naines blanches. D'autres au contraire, ont une masse trop faible, comme ϵ Ceti. Enfin, fait curieux, quelques compagnons sont plus massifs que leur primaire, comme dans les systèmes de 9 Puppis et ADS 61.

Les parallaxes dynamiques

La loi Masse-Luminosité a donc été découverte par Eddington en étudiant la structure interne des étoiles. De nombreux auteurs ont mis cette relation sous une forme empirique, et en ont déduit une méthode propre à calculer des parallaxes d'étoiles doubles d'orbite connue. De telles parallaxes sont qualifiées de dynamiques; leur validité repose sur celle de la loi Masse-Luminosité, à laquelle les étoiles satisfont plus ou moins rigoureusement. L'avantage de ce calcul est d'accéder à des parallaxes faibles, et de guider l'astronome dans son choix.

Il existe deux méthodes principales de calcul de parallaxes dynamiques : celle de H. N. Russell et C. E. Moore (1940), et celle de P. Baize et L. Romani (1946). Nous décrivons cette dernière, plus récente et plus facile à utiliser que la première. D'ailleurs les deux méthodes donnent des résultats voisins.

P. Baize (1943) écrit la relation sous la forme :

$$\log \mu = -k(M - M_{\odot}) \quad (52, VI)$$

où

μ est la masse en unités solaires,

k une constante égale à 0,1117,

M la magnitude absolue bolométrique de l'étoile,

M_{\odot} la magnitude absolue bolométrique du Soleil, égale à 4,77.

Nous rappelons que la magnitude absolue est celle que présenterait l'étoile si elle était observée à dix parsecs. Il en résulte que la magnitude absolue, la magnitude apparente m et la parallaxe p sont liées par :

$$M = m + 5 + 5 \cdot \log p \quad (53, VI)$$

C'est la formule de Pogson.

La magnitude de l'étoile est une donnée photométrique, liée aux longueurs d'onde auxquelles est sensible le récepteur. Si $e(\lambda)$ est l'énergie par unité de longueur d'onde, le récepteur mesure :

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \cdot e(\lambda) \cdot d\lambda$$

C étant le facteur de transmission du récepteur. Si ce dernier est l'oeil, la magnitude est visuelle; elle est photographique, photo-visuelle, infrarouge, selon les plaques ou cellules photoélectriques choisies. On qualifie de bolométrique une magnitude liée au rayonnement total :

$$E_T = \int_0^{\infty} e(\lambda) \cdot d\lambda$$

L'écart entre une magnitude visuelle et bolométrique s'appelle la « correction bolométrique », il vaut en théorie :

$$\Delta m = 2,5 \log \frac{E}{E_T} = C$$

Entre la magnitude visuelle et la magnitude bolométrique on a l'égalité :

$$m_b = m_v + C_v \quad (54, VI)$$

C_v est une fonction du type spectral ou de la température des étoiles. Le tableau suivant est celui de D. L. Harris III (1963) pour la série principale, à l'exception du type M où ce sont les valeurs de P. Baize (1943). Mais la correction est imprécise pour ce type, à cause de la sélectivité des récepteurs.

| Sp | C_v | SP | C_v | Sp | C_v | Sp | C_v |
|----|--------|----|--------|----|--------|----|----------|
| B5 | — 1,39 | A1 | — 0,32 | F5 | — 0,04 | K3 | — 0,35 |
| B6 | — 1,21 | A2 | — 0,25 | G0 | — 0,06 | K5 | — 0,71 |
| B7 | — 1,04 | A3 | — 0,20 | G5 | — 0,10 | K7 | — 1,02 |
| B8 | — 0,85 | A5 | — 0,15 | G8 | — 0,15 | M0 | (— 1,22) |
| B9 | — 0,66 | A7 | — 0,12 | K0 | — 0,19 | M2 | (— 1,43) |
| A0 | — 0,40 | F0 | — 0,08 | K2 | — 0,25 | M4 | (— 1,67) |

Considérons un système d'étoile double où l'orbite est connue, mais non la parallaxe. Il est facile de montrer que l'application combinée des équations (40, VI), (52, VI) et (53, VI) permet de calculer une parallaxe et des masses, appelées parallaxes et masses dynamiques. En effet écrivons d'abord :

$$\mu_A + \mu_B = \mu_A \left(1 + \frac{\mu_B}{\mu_A} \right)$$

En vertu de (52, VI), on a :

$$\mu_B / \mu_A = 10^{-k \cdot \Delta m} \quad (55, VI)$$

où Δm est la différence de magnitude bolométrique entre les composantes, valeur toujours positive. D'après (54, VI) on a :

$$\Delta m_b = m_{vB} - m_{vA} + C_{vB} - C_{vA}$$

Si les deux spectres sont identiques, la correction ne joue pas. Il résulte de (55, VI) l'égalité :

$$\mu_A + \mu_B = \mu_A(1 + 10^{-k \cdot \Delta m}) = \frac{a''^3}{p^3 P^2} \quad (56, VI)$$

ou encore

$$\mu_A + \mu_B = \mu_A \cdot D = \frac{\alpha^3}{p^3}$$

en posant pour simplifier l'écriture :

$$D = 1 + 10^{-k \cdot \Delta m} \quad \text{et} \quad \frac{a''^3}{P^2} = \alpha^3$$

Faisant intervenir la loi de Pogson dans la relation Masse-Luminosité et explicitant la parallaxe on obtient facilement :

$$\left(1 - \frac{5}{3}k\right) \cdot \log p = \log \alpha + \frac{k}{3}(m_{vA} + C_{vA} + 5 - M_{\odot}) - \frac{1}{3} \log D \quad (57, VI)$$

C'est la formule trouvée par Baize-Romani, mais établie ici par une voie plus directe. En utilisant les valeurs de ces auteurs, on a :

$$\log p = 0,010 + 1,229 \cdot \log \alpha + 0,046(m_{vA} + C_{vA}) - 0,410 \log D \quad (58, VI)$$

On a ainsi la parallaxe, dite dynamique, en fonction du demi-grand axe, de la période, de la magnitude visuelle apparente de la composante A et de la différence de magnitude entre les composantes.

L'influence de ces paramètres n'est pas la même sur la parallaxe. Ainsi le dernier terme varie de $-0,12$ pour $\Delta m = 0$ à $-0,07$ pour $\Delta m = 3$. Le type spectral joue un rôle par l'intermédiaire de la correction bolométrique C_v . Mais cette correction entre dans l'équation avec un facteur petit, de sorte que des échelles différentes de correction ne changent guère le résultat; il en est de même de l'influence de spectres différents sur la fonction D. Ce sont les paramètres de l'orbite qui jouent le rôle primordial.

Pour ceux qui ne disposent pas de calculatrice, on peut rendre l'équation (58, VI) plus aisée à appliquer en remplaçant la fonction $\log D$ par les deux premiers termes de son développement en série au voisinage de l'origine :

$$\log D = \log 2 - \frac{k}{2} \Delta m \quad (59, VI)$$

Jusqu'à $\Delta m = 2$ l'incidence sur la valeur de la parallaxe est inférieure à 1 pour 100.

On peut obtenir directement les masses par le jeu des équations qui ont permis d'expliciter la parallaxe, on trouve aisément :

$$\frac{3 - 5k}{k} \cdot \log \mu_A = 5 \cdot \log D - 3 \cdot \log \beta - 15 \cdot \log \alpha$$

avec $\beta = m_{vA} + C_{vA} - M_{\odot} + 5 \quad (60, VI)$

ce qui donne avec les valeurs adoptées par Baize-Romani :

$$\log \mu_A = -0,0315 - 0,137(m_{vA} + C_{vA}) + 0,229 \cdot \log D - 0,686 \cdot \log \alpha \quad (61, VI)$$

Pour la composante B, on a une formule identique, à la fonction D près. qui est remplacée par :

$$\log D' = \log(1 + 10^{+k \cdot \Delta m}) = \log 2 + \frac{k}{2} \Delta m + \dots$$

On a ainsi la masse, donnée intrinsèque à l'étoile, sans passer par la parallaxe dynamique. Les calculateurs préfèrent obtenir d'abord la parallaxe dynamique, parce que ce paramètre est susceptible d'une mesure directe, non la masse, et parce qu'un contrôle est possible avec d'éventuelles parallaxes trigonométriques. Mais l'application ci-dessus donne les masses individuelles, tandis que la parallaxe dynamique ne donne que leur somme.

Avec le développement limité à deux termes de la fonction $\log D$, on a un accord supérieur à 1 pour 100 jusqu'à $\Delta m = 2$.

Dans les équations (58, VI et 61, VI), on suppose connus les deux spectres des composantes. Plus

souvent, on ne connaît que le spectre global. On suppose alors que les deux spectres sont identiques. L'erreur ainsi introduite est négligeable, parce qu'à deux spectres très différents correspond un grand Δm , et dans ce cas $\log D$ tend vers zéro.

Si le type spectral est totalement inconnu, on détermine avec P. Baize, une masse préliminaire dont la valeur renseigne sur le spectre probable, qu'on utilise en deuxième approximation.

Outre l'importance des paramètres de l'orbite, il faut noter celle de la magnitude visuelle. De bonnes valeurs de parallaxes et de masses dynamiques passent obligatoirement par de bonnes mesures photométriques.

Cherchons enfin à connaître l'influence d'une faible variation du facteur k sur celle des masses. Prenons la dérivée partielle par rapport à k de l'équation (60, VI) :

$$\frac{\partial}{\partial k} \log \mu A = \left[\begin{array}{l} \frac{5}{(3 - 5k)^2} 3 \cdot \log 2 \\ - \frac{k(6 - 5k) \Delta m}{2} - \frac{9}{5} \beta - 9 \cdot \log \alpha \end{array} \right] \quad (62, VI)$$

La variation de la masse est indépendante de k si le crochet est nul. Un sondage montre que cette condition n'est pas loin d'être réalisée pour les binaires de type G. Pour les autres, le résidu est toujours faible. C'est ce qui explique le succès de la méthode de calcul des parallaxes dynamiques. Elle est peu sensible aux petits écarts à la loi Masse-Luminosité.

Applications

- 1) Choisissons α Cent. dont la parallaxe trigonométrique est connue. L'orbite de W. D. Heintz (1968) donne d'abord : $a'' = 17,583$ P = 79,920 ans on a par ailleurs :

| | composante A | composante B |
|---------|--------------|--------------|
| spectre | G2V | K0V |
| mv | — 0,04 | 1,17 |
| Cv, | — 0,08 | — 0,19 |

d'où $\Delta m = 1,10$ $\log \alpha = -0,02334$ $\log D = 0,2439$ et on obtient le tableau comparatif :

| | Dynamique | Trigonométrie |
|-----------|-----------|---------------|
| parallaxe | 0",751 | 0",743 |
| μA | 1,14 | 1,12 |
| μB | 0,86 | 0,95 |

On trouve une masse dynamique plus faible pour le compagnon, conformément à son écart à la loi Masse-Luminosité (fig. 14-VI).

- 2) Choisissons maintenant ADS 8987 = β 612 de parallaxe inconnue. L'orbite de A. Danjon (1956) donne

$a'' = 0,208$ P = 22,35 ans D'autre part :

mvA = mvB = 6,3 Spectre global : A6 d'où Cv = — 0,13

On trouve : paral. dyn. 0",01686 $\mu A = \mu B = 1,89$

NOTES BIBLIOGRAPHIQUES

En plus des travaux signalés dans le texte, nous donnons quelques références en suivant l'ordre du chapitre.

Orbites. Généralités

Il existe plusieurs tables de passage des anomalies moyennes aux anomalies vraies :

F. SCHLESINGER et S. UDICK. — Tables for the true anomaly in elliptic orbits. Publ. Allegheny Obs, vol. II, 1912.

Cette table s'arrête à $e = 0,77$. On trouvera une table complémentaire faite à notre demande lors de la réunion à Berkeley de l'Union Astronomique Internationale :

P. MULLER. — Table des anomalies vraies jusqu'à l'anomalie moyenne de 20 degrés pour les excentricités

égales ou supérieures à 0,75. Notes et Informations. Fasc. VI, Astrométrie n°5. Obs. Paris, 1961.

Une table remarquable a été publiée en U.R.S.S. en 1960 :

I. D. JONGOLOVITCH et V. M. AMELIN. — Recueil de tables et monogrammes pour le calcul des trajectoires de satellites artificiels de la Terre. (En russe.) Inst. d'Astron. Théorique de l'Acad. des sciences de l'U.R.S.S.

On trouvera une table du mouvement képlérien dans l'Astronomie générale de A. Danjon.

Les coordonnées réduites X et Y, en fonction de l'excentricité et de l'anomalie moyenne ont été publiées à Pretoria en 1927. Appendix 10 Union Obs, circular n° 71.

L'usage des calculatrices électroniques de poche rend peu à peu inutile l'emploi des tables de fonctions trigonométriques. Signalons toutefois un ouvrage très commode :

A. DANJON. — Fonctions trigonométriques. Valeurs naturelles à six décimales, Hachette, 1948.

Calcul des orbites. Méthodes géométriques

P. BAIZE. — Comment calculer une orbite d'étoile double. L'Astronomie, janvier 1954, p. 22.

P. VAN DE KAMP. — Two Graphical Procedures for evaluating the excentricity of an astrometric double star orbit. A.J. 52, n° 7, p. 185, 1947.

Calcul des orbites. Méthode de Thiele-Innes-van den Bos

W. H. VAN DEN BOS. — Orbit Determinations of Visual Binaries. Astronomical Techniques, Univ. of Chicago Press, p. 537, 1962.

S. AREND. — Etablissement par voie raccourcie des formules de Thiele-Innes relatives aux orbites d'étoiles doubles visuelles, en recourant aux principes de l'affinité. Ann. Obs. Toulouse, XVI, p. 109, 1941.

J. DOMMANGET. — Propriété du système des équations fondamentales de la méthode de Thiele-Innes pour le calcul d'orbites d'étoiles doubles visuelles. J.O. 42, p. 129, 1959.

S. AREND. — Le rôle joué par les constantes de Thiele-Innes dans le calcul des orbites des étoiles doubles visuelles. Commun. Obs. Royal de Belgique, n° 195, 1961.

S. AREND. — Détermination du moyen mouvement annuel du compagnon d'une étoile double visuelle dont l'orbite est calculée par la méthode de Thiele-Innes. Commun. Obs. Royal de Belgique, n° 243, 1970.

L. BINNENDIJKKE. — Properties of Double Stars. A survey of parallaxes and orbits. University of Pennsylvania Press, 1960.

Calcul des orbites. Méthode des points opposés

les travaux de A. Danjon sont cités dans le texte.

P. MULLER. — Table pour le calcul des éléments des orbites des étoiles doubles visuelles. Ann. Obs. Strasbourg, t. V, 1956.

P.J. MOREL. — Remarques sur l'utilisation de la méthode des moindres carrés dans la méthode des points opposés de Danjon pour le calcul des orbites d'étoiles doubles visuelles. Bull. Astron. Obs. Royal de Belgique. VII, n° 4, p. 191, 1971.

Catalogue d'orbites. Ephémérides

W. S. FINSSEN et C. E. WORLEY. — Third Catalogue of orbits of visual binary stars. Rep. Obs. Johannesburg circ., vol. VII, n° 129, 1970.

J. DOMMANGET et O. Nvs. — Catalogue d'éphémérides des vitesses radiales relatives des composantes des étoiles doubles visuelles dont l'orbite est connue. Commun. Obs. Royal de Belgique, n° 15, 1967.

P. MULLER et Cl. MEYER. — Troisième catalogue d'éphémérides d'étoiles doubles. Publ. Obs. Paris, 1969.

Masses et rapport de masses

P. VAN DE KAMP. — Long focus photographie astrometry. Popular Astronomy, n° 2, 3, 4, 5, 1951.

P. VAN DE KAMP. - Principles of astronomy, Freeman, 1967.

P. J. MOREL. — Contribution à la détermination photographique du rapport de masse d'une binaire visuelle.

Thèse de Spécialité. Obs. Nice, 1969.

P. MULLER. — Etoiles doubles visuelles. Masses des étoiles. Annuaire du Bureau des Longitudes, 1970.

Parallaxes dynamiques

D. BARBIER. — Les Parallaxes dynamiques des étoiles doubles. Actualités Scientifiques et Industrielles, 348, 1936.

H. N. RusseL et C. E. MOORE. — The masses of the stars. Univ. of Chicago Press. 1940.

P. BAIZE. — La Masse des étoiles et la relation empirique masse-luminosité. L'Astronomie, p. 101, juill. 1943.

P. BAIZE. — Les masses des étoiles doubles visuelles et la relation empirique masse-luminosité. Bull. Astron., t. XIII p. 123, 1947.

P. BAIZE et L. ROMANI. — Formules nouvelles pour le calcul des parallaxes dynamique des couples orbitaux. Ann. d'Astroph., t. IX, fasc. 2, p. 13, 1946.

J. DOMMANGET. — Les Parallaxes dynamiques. Ciel et Terre, n° 2, 92, 1976.

P. COUTEAU. — Sur la validité de la relation masse-luminosité dans le calcul des masses des étoiles. Astroph. and Space Science, II, p. 55, 1971.

D. L. HARRIS III, K. Aa. STRAND et C. E. WORLEY. Empirical Data on stellar masses, luminosities and radii. Basic Astron. data. Univ. of Chicago Press. p. 273, 1963.

Dans cet article les auteurs donnent deux relations masse-luminosité $M_b = 4,6 - 10,0 \log \mu$ valable pour les étoiles plus brillantes que $M_b = 7,5$ et donnent pour les autres $M_b = 5,2 - 6,9 \log \mu$. La relation de Baize, intermédiaire, a l'avantage d'être unique et de s'appliquer à toutes les masses.

P. BAIZE. — Les Etoiles doubles et la relation masse-luminosité. L'Astronomie, p. 306, juill. 1975.

CHAPITRE VII

VOYAGE AU PAYS DES ÉTOILES DOUBLES

Quelques systèmes typiques

Regarder un système d'étoiles dans une lunette ou un télescope porte l'esprit en voyage lointain. Si le système se trouve à une distance connue, composé d'astres que l'astronome peut comparer à notre soleil, il est aisé de s'y transporter par la pensée et d'imaginer le spectacle pour les habitants du lieu.

Souvent le système ne livre pas son secret; ni la distance ni l'orbite ne sont connues. C'est la généralité, presque toutes les étoiles doubles classées sont dans ce cas, elles sont formées d'astres très lumineux, circulant avec lenteur sur des orbites gigantesques. Beaucoup paraissent fixes depuis près de deux siècles d'observation, comme le compagnon d'Antarès ou celui de Rigel.

Par contre, les systèmes connus forment une famille dont nous apprenons beaucoup, qui nous permettent d'avoir une idée de la population stellaire au voisinage du Soleil, grâce à la connaissance des parallaxes dynamiques et des masses.

On constate que les étoiles doubles présentent toutes les périodes possibles, depuis quelques heures pour des astres en contact, inobservables visuellement, mais non spectroscopiquement, jusqu'à (les millénaires. Aux très grandes séparations, les perturbations dissocient le système dont chaque composante devient une étoile simple.

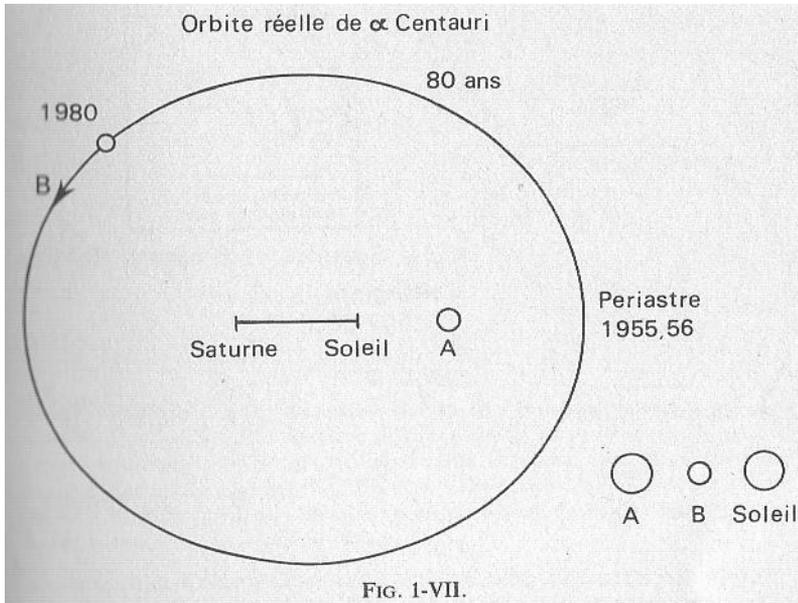
Les sept cents étoiles doubles d'orbite connue montrent toutes les excentricités possibles, toutes les inclinaisons. Tous les types d'étoiles sont représentés. Il semble que les binaires ne constituent pas une classe privilégiée, rien dans la structure d'une étoile ne différencie une simple d'une double. Leur nombre est si grand que la majorité des astres font partie d'un système; les étoiles simples, tel notre soleil, formant la minorité.

La répartition sur le ciel des étoiles doubles est la même que celle des étoiles simples, elle est galactique. Il n'en est pas de même des orbites qui ont un peuplement homogène. Cela signifie que les couples d'orbite connue occupent un volume petit par rapport à la Galaxie. Les parallaxes dynamiques montrent qu'ils se trouvent dans une sphère d'une centaine de parsecs centrée sur le Soleil.

L'étude des étoiles doubles a permis de comparer les étoiles au Soleil en masse, en puissance lumineuse, en dimension. L'étendue des systèmes connus est comparable à celle du système solaire limité à Pluton. Nous rappelons que notre grand luminaire occupe le milieu de l'échelle en masse et en lumière. Les volumes sont tellement différents qu'il est difficile de préciser ce dernier point : il y a des étoiles massives comme le Soleil, mais plus petites qu'un département français, d'autres si grandes qu'elles ne tiendraient pas dans le système solaire. Les naines rouges sont très abondantes, c'est la population la plus nombreuse. Sur les cent étoiles les plus proches, le Soleil occupe le quatrième rang pour la puissance rayonnée. Les températures superficielles vont de 2 500° pour le type M à des dizaines de milliers pour les étoiles O et B.

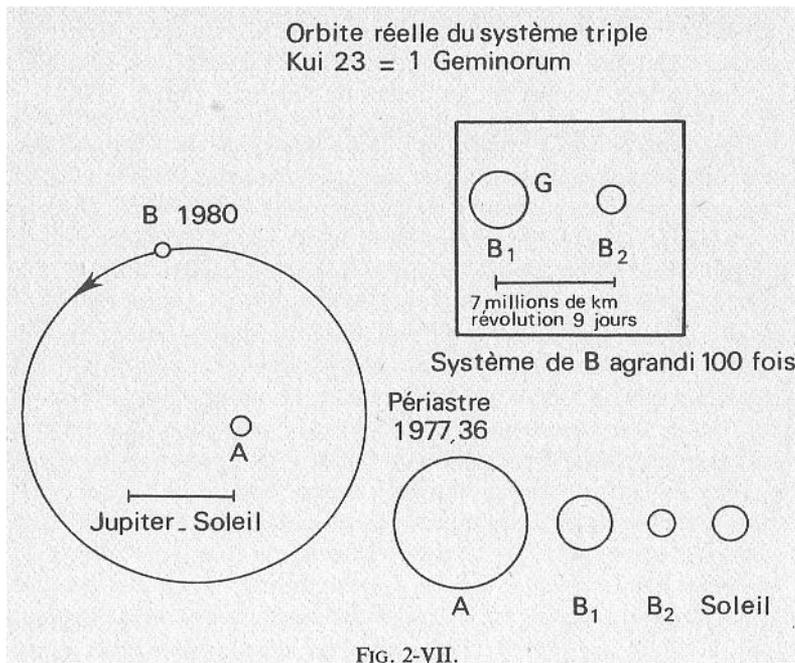
Il n'est pas difficile d'imaginer le spectacle qui s'offrirait à nous si la Terre était une planète d'une étoile double. Tel Micromégas, imaginons-nous habitants de Sinus, situé à 2,5 parsecs, ou huit années de lumière, sur une Terre circulant autour de cette étoile à la même distance que nous nous trouvons du Soleil. Sirius, sphère d'un blanc éclatant de plus d'un degré de diamètre, brillerait cent fois comme le Soleil. Le compagnon de Sirius nous apparaîtrait la nuit comme une simple étoile d'une seconde de degré de diamètre, répandant une lumière blanchâtre d'intensité analogue à notre pleine lune. Cette naine blanche mesure quinze mille kilomètres de diamètre, malgré une masse comparable à celle du Soleil. Vue de chez nous, cette petite étoile serait cachée par l'épaisseur d'un cheveu à deux mille kilomètres de distance. La surface de cet astre serait indiscernable, c'est probablement une plage uniforme, car la force de pesanteur, dix mille fois la nôtre, y interdit tout échafaudage ou relief quelconque.

Sur notre proche voisine α du Centaure, à quatre années de lumière, nous retrouvons une étoile analogue au Soleil, rien ne nous paraîtrait changé le jour, mais nos nuits seraient éclairées par le compagnon d'une belle couleur cuivre, circulant sur une orbite grande comme celle de Neptune. Ce compagnon nous apparaîtrait sous un diamètre insensible à l'oeil nu, mais d'un éclat insoutenable, répandant une lumière mille fois supérieure à celle de la Lune. A certaines époques, voisins de l'opposition, il n'y aurait pas de nuits, les deux soleils se relayant au dessus de l'horizon (fig. I-VII).



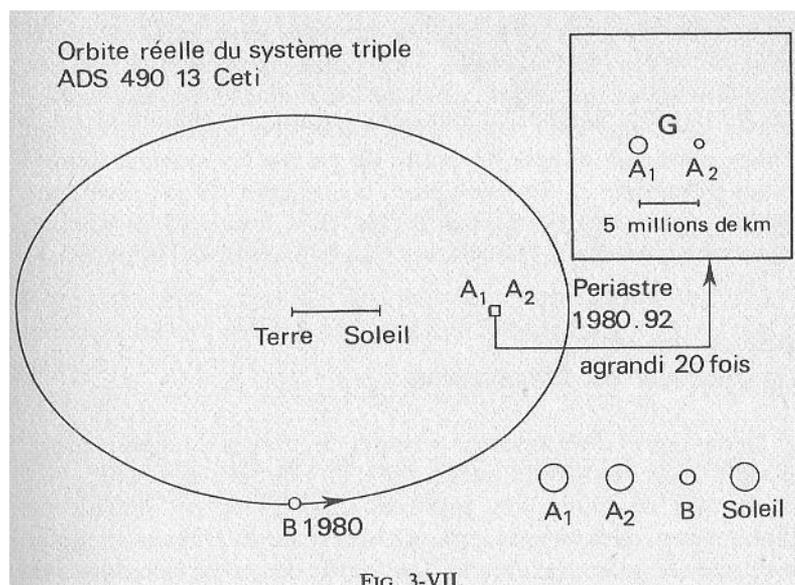
Le système comprend une troisième étoile naine rouge très éloignée. L'astre A est comparable au Soleil. L'astre B circule sur une orbite de l'étendue de celle de Neptune. En bas à droite, les disques représentent les dimensions relatives des composantes et du Soleil.

De nombreux systèmes comportent plus de deux étoiles et forment une association dynamiquement hiérarchisée de type Soleil-Terre-Lune. Ainsi les habitants du système KUI 23, à soixante et onze années de lumière de nous, sont éclairés par un astre central, ressemblant à Capella, cinquante fois plus gros que le Soleil. Leurs nuits sont illuminées par un soleil lui-même double, circulant sur une orbite intermédiaire entre celles de Jupiter et Saturne. Ce système satellite est formé de deux étoiles, indissociables de chez nous, à peu près de la taille du Soleil, tournant l'une autour de l'autre en neuf jours à une distance de sept millions de kilomètres. Ces deux astres jumeaux, d'une belle couleur rouge, s'éclipsent parfois mutuellement et forment une horloge naturelle dans les cieux des habitants de KUI 23, ils inspirent peintres et poètes et donnent aux astronomes du lieu des sujets inépuisables de recherches.



Ce système comprend une primaire simple et un satellite double B1 B2 circulant, en treize ans, sur une orbite peu allongée de la dimension de celle de Saturne. Dans le carré le système B, non visuel, est représenté à l'échelle agrandie cent fois. La révolution de B1B2 autour du centre de gravité G est de neuf jours, sur une orbite circulaire de sept millions de kilomètres de diamètre. En bas, les dimensions des étoiles sont comparées à celle du Soleil.

Les habitants du système triple 13 Ceti, à cinquante-six années de lumière, bénéficient d'un astre central double lui-même, formé de deux astres dissemblables jaune et rouge, tournant en trois jours à cinq millions de kilomètres de distance. La valse éternelle de ces soleils inspirent là aussi artistes et astronomes. Les nuits sont éclairées par le compagnon rouge qui s'approche tous les sept ans au point de rivaliser d'éclat avec l'étoile principale. C'est une féerie de lumière, car à certaines époques il n'y a pas de nuit, le soleil rouge éclatant se lève pendant que descend sous l'horizon l'astre double bicolore autour duquel tournent les habitants. A d'autres moments ce sont trois soleils qui éclairent le paysage, jetant trois ombres pour chaque objet.



Le système triple 13 Ceti comprend une primaire A1A2, elle-même double non visuelle, et un satellite B tournant en sept ans autour du système central sur une orbite assez allongée, un peu plus petite que celle de Jupiter. Le carré montre à une échelle vingt fois plus grande les dimensions et la distance de A, A2 avec leur centre de gravité G. La révolution du système A est de deux jours. En bas les dimensions des étoiles sont comparées à celle du Soleil.

Dans d'autres systèmes, comme ζ de la Grande Ourse, chaque composante de l'étoile double est double elle-même. Castor est sextuple, le couple visuel est formé de deux composantes doubles, et autour de ce système, très loin, tourne une naine rouge double elle aussi.

Ces quelques exemples montrent que les étoiles doubles visuelles sont constituées d'astres très éloignés les uns des autres, des centaines ou des milliers de fois leur diamètre, même dans les cas où les composantes paraissent se toucher. L'image de diffraction est beaucoup plus étendue que l'astre lui-même dont le diamètre apparent est de l'ordre du millième de seconde de degré.

Dans tous ces systèmes il y a une hiérarchie, à l'inverse des amas d'étoiles, où le centre attractif est formé par l'amas lui-même. Dans ce dernier cas, les étoiles ne se meuvent pas sur des orbites mutuelles, ce sont des systèmes en voie de dissociation, comme les Pléiades, ou en équilibre comme les amas globulaires. Les étoiles doubles offrent le spectacle de mouvements képlériens autour de plusieurs centres de gravité. Nous en trouvons des exemples avec les satellites du système solaire. Par exemple, les satellites artificiels de la Lune obéissent au centre de gravité de la Lune, qui, elle-même gravite autour du barycentre Terre-Lune, l'ensemble tourne autour du Soleil, mais non autour du centre de gravité du système solaire. Nous effleurons ici les problèmes compliqués de la mécanique céleste, dont certaines étoiles triples, à la limite de la stabilité dynamique, comme ζ Hercule, sont un bon exemple d'application.

Intérêt du voyage en fonction de l'instrument

Le voyage de l'observateur au pays des étoiles doubles est réel, puisqu'il voit les corps célestes comme s'il s'en était approché. Mais on a plus de choix, on gagne en lumière et en pouvoir de discernement avec un gros appareil. Voir remuer l'Univers, compter les étoiles, se promener dans la Voie lactée, découvrir des astres que personne d'autre n'a encore vus, dépendent de la dimension de l'instrument. Nous allons préciser les possibilités de voyage en insistant sur un certain nombre de ses aspects. Comme les agences de tourisme, on va établir des propositions selon l'importance des moyens.

Étudions la réponse à une première question. Combien de temps faut-il attendre pour connaître l'orbite d'une étoile double qu'on vient de découvrir? Cette question définit la rapidité de l'information. Pour pouvoir calculer une orbite, il faut à peu près un intervalle d'une demi-révolution depuis l'époque de la découverte. Comment la longueur de ce temps dépend-elle de la séparation des composantes et de l'ouverture de l'instrument?

Quand on découvre un couple, on mesure la séparation ρ . On peut supposer que le demi-grand axe est statistiquement peu différent. Nous avons montré il y a quelques années (1960), qu'on peut écrire :

$$a'' \approx 1,25 \cdot \rho$$

Si on recherche les couples les plus rapides, on retient ceux qui sont à la limite du pouvoir séparateur. On associe donc à ρ le pouvoir séparateur $12/D$, ce qui permet d'y relier le demi-grand axe :

$$a'' \approx 15/D \quad \text{ou} \quad a_{UA} \approx 15 \cdot r/D \quad (1, VII)$$

où r est la distance en parsecs et D l'ouverture en centimètres.

D'autre part, on peut formuler l'hypothèse que la masse du système est voisine de deux fois celle du Soleil. Ce qui donne un ordre de grandeur des périodes, par application de la troisième loi de Képler :

$$P^2 \approx 1,2 \cdot 10^3 \cdot r^3/D^3 \quad (2, VII)$$

Pour une même parallaxe, les périodes les plus courtes P_1 et P_2 accessibles à des ouvertures D_1 et D_2 obéissent à :

$$P_1/P_2 = (D_2/D_1)^{3/2} \quad (3, VII)$$

Quand on double l'ouverture, la période la plus courte accessible est 2,8 fois plus petite à distance égale.

La rapidité de l'information croît comme $D^{3/2}$

Le tableau suivant donne à cent parsecs la rapidité pour quelques ouvertures.

| | D cm | P ans | temps information |
|-------------|--------|--------|-------------------|
| 100 parsecs | 150 cm | 18 ans | 9 ans |
| | 100 | 35 | 17 |
| | 50 | 97 | 48 |
| | 25 | 280 | 140 |
| | 10 | 1 100 | 550 |

Ce tableau montre l'intérêt des grandes ouvertures pour la découverte et la possibilité de calculs d'orbites dans des délais raisonnables. Pour qu'un astronome ait des chances de pouvoir connaître les orbites des binaires qu'il découvre, il lui faut disposer d'une lunette d'au moins 70 cm d'ouverture. Et encore devra-t-il attendre vingt-cinq ans en moyenne pour les objets situés à cent parsecs.

Pénétration céleste d'un instrument

Étudions une autre question. Jusqu'à quelle profondeur céleste, et avec quel instrument, peut-on voir des couples de période inférieure à une valeur donnée?

La réponse à cette question fournit la profondeur orbitale d'un instrument. Pour y répondre aisément, il convient de formuler les restrictions suivantes :

1. On ne considère que les périodes inférieures à deux cents ans, correspondant à un temps d'information d'un siècle, ce qui est déjà un long délai, bien plus long que la vie active d'un astronome.

2. On se limite aux couples accessibles au pouvoir séparateur de l'instrument.

3. On suppose toujours les masses voisines de celle du Soleil.

4. Enfin on se limite aux couples de composantes égales, dont les magnitudes apparentes sont plus lumineuses ou égales à dix. L'expérience montre, en effet, que, quelle que soit l'ouverture, la magnitude dix est une barrière. Dans un gros instrument, les images perdent de leur finesse, elles se fragmentent, la lumière se dissipe dans les anneaux et l'oeil n'y gagne pas tellement en éclat.

Les conditions 1 et 3 montrent que les demi-grands axes sont limités à $a_1 = 43$ U.A. La condition 2 impose une limite inférieure, en dessous de laquelle on ne sépare plus les composantes :

$$a_r \approx 15 \cdot r/D \quad (4, VII)$$

en unités astronomiques. La condition 4 impose d'autre part :

$$\log r \approx 3 - 0,2 \cdot M \quad (5, VII)$$

relation qui exprime le rayon de la sphère, centrée sur le Soleil, où les étoiles de magnitude absolue M sont au moins aussi lumineuses que la magnitude 10.

Associant cette dernière relation à $a_1 = 43$ U.A. on en déduit le demi-grand axe maximum apparent a''_1 au-delà duquel la période est supérieure à deux siècles :

$$\log a''_1 \approx 0,2 \cdot M - 1,37(6, VII)$$

Enfin par la loi de Pogson appliquée à (4, VII), on trouve le demi-grand axe minimum en unités astronomiques a_r :

$$\log a_r \approx 3 - 0,2 \cdot M + \log (15/D) \quad (7, VII)$$

Lorsque $a_r = a_1 = 43$, on atteint la limite instrumentale d'observation des orbites. Elle a lieu pour :

$$\log r \approx \log D + 0,45 \quad (8, VII)$$

équation qui définit la profondeur orbitale. A cette distance limite est associée la magnitude absolue :

$$M \approx 12,75 - 5 \cdot \log D \quad (9, VII)$$

Ces relations donnent des ordres de grandeur. On pourrait les affiner, au prix de complications d'écriture, en faisant intervenir la loi Masse-Luminosité. Mais la réponse cherchée n'y gagnerait rien en clarté.

On peut résumer ces quelques considérations par un tableau, et les illustrer par une figure. Dans le tableau ci-contre,

| | A5 | F5 | G0 | G5 | K0 | K5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M | 2,2 | 3,5 | 4,4 | 5,1 | 6,0 | 7,8 |
| r | 360 | 200 | 130 | 96 | 63 | 28 |
| V | 47 | 8 | 2 | 0,9 | 0,25 | 0,02 |
| a''_1 | 0",12 | 0",21 | 0",32 | 0",45 | 0",67 | 1",55 |
| Dcm | 125 | 70 | 45 | 33 | | |

limité aux étoiles de la série principale, on trouve en première ligne le type spectral, en deuxième ligne la magnitude absolue correspondante, puis la distance en parsecs à laquelle l'étoile est vue de magnitude 10, la quatrième ligne donne le volume correspondant en prenant comme unité une sphère de cent parsecs de rayon. Les cinquième et sixième lignes donnent la séparation apparente pour que la période soit égale à deux siècles, puis l'ouverture limite D correspondante.

A partir du type G5 ce n'est plus la diffraction, mais l'éclat, qui limite l'observation des naines rouges. Avec une ouverture de 125 cm on peut observer des périodes de deux siècles jusqu'à 360 parsecs, ou 1 200 années de lumière, pour des étoiles de type A5 et plus froides. Le volume exploré est vingt-quatre fois supérieur à celui qui correspond à une ouverture de 45 cm. Cette dernière ouverture atteint, dans les mêmes conditions, les étoiles de type solaire jusqu'à 130 parsecs. Bien entendu, on observe aussi des étoiles doubles beaucoup plus lointaines et plus lumineuses, mais leurs périodes dépassent deux siècles et le calcul de leurs orbites est repoussé d'autant.

Le pays des étoiles doubles d'orbites calculables trouve sa frontière au voisinage de 1 200 années de lumière avec nos moyens actuels. C'est déjà un volume considérable, qui occupe l'épaisseur de la Galaxie dans la région excentrique où nous sommes.

Le tableau montre pourquoi les types F et G sont privilégiés par la sélection observationnelle; les couples limites qui y sont associés correspondent à des ouvertures de 90 à 40 cm. Ce sont précisément les dimensions des grandes lunettes qui ont servi aux prospections. Ces couples se trouvent entre cent et trois cents parsecs.

La figure (4-VII) délimite la région où les orbites sont observables. L'abscisse donne les parsecs, l'ordonnée les demi-grands axes en unités astronomiques. La droite horizontale correspond au maximum au-delà duquel les périodes sont supérieures à deux siècles. Les droites issues de l'origine déterminent les demi-grands axes minimum pour des instruments de 120 et 70 cm d'ouverture. Les traits interrompus indiquent les limites de distance au-delà de laquelle les étoiles, de type indiqué par une flèche, sont trop faibles d'éclat.

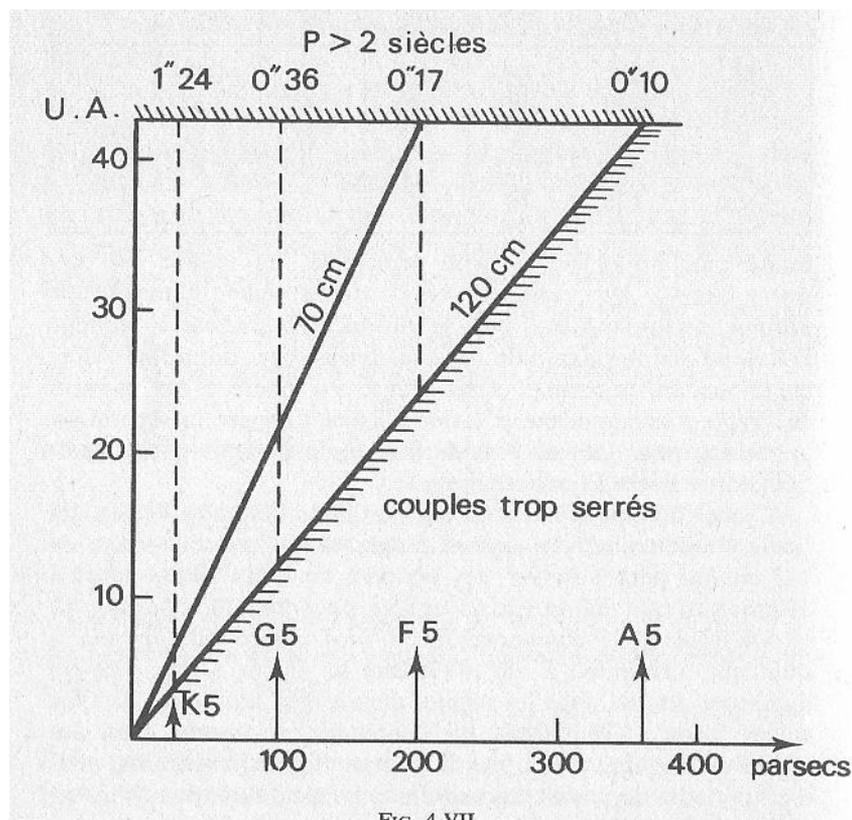


FIG. 4-VII.

Avec une ouverture de 120 cm, on peut observer des orbites de période inférieure à deux siècles jusqu'à 350 parsecs, ou 1 150 années de lumière, mais à cette distance on n'observe que des géantes. Les étoiles de type solaire ne sont observables qu'à 150 parsecs, ou 500 années de lumière. Avec une lunette de 70 cm, on n'atteint que 200 parsecs, ou 650 années de lumière.

Exemples :

L'orbite d'une étoile F5 est observable jusqu'à 200 parsecs, au-delà elle est trop faible ($m > 10$). A la limite des 200 parsecs, les séparations sont comprises entre $0'',1$ et $0'',17$.

L'orbite d'une étoile B est observable jusqu'à 360 parsecs.

Supposons un couple de G5 à 160 parsecs dont l'orbite a un demi-grand axe de 30 U.A. Sa séparation permet d'en observer l'orbite, mais pas sa magnitude.

Supposons maintenant un couple de A5 à 300 parsecs avec une orbite de 20 U.A. de demi-grand axe. Sa magnitude permet de le voir, mais sa séparation est trop faible pour un calcul d'orbite.

On explique ainsi la forte proportion relative de naines rouges d'orbite connue, par rapport aux autres types. Toutes les naines rouges recensées sont obligatoirement tout près de nous. A un même écartement angulaire correspond un grand axe apparent plus petit que pour les autres types, d'où des périodes courtes, assez vite connues. Tandis que les étoiles chaudes B sont en moyenne beaucoup plus loin, leur écartement angulaire n'est visible que s'il correspond à des orbites à longues périodes.

Nombre d'orbites accessibles à un instrument

Nous sommes maintenant en mesure de préciser la loi de répartition des orbites selon le spectre des étoiles. Soit :

$$dn = q(a) \cdot da \quad (10, VII)$$

Le nombre de binaires, par unité de volume, dans l'intervalle de demi-grand axe da, à la distance r du Soleil. Nous nous proposons de trouver le nombre d'orbites qu'on peut espérer d'une ouverture D, par type spectral.

Le nombre de binaires observables, par unité de volume, à la distance r est donc

$$n(r) = \int_{a_r}^{a_1} q(a) \cdot da = q(a_1 - a_r)$$

en supposant q constant, ce qui est raisonnable compte tenu de la petitesse de l'intervalle d'intégration. Pour chaque type spectral, la constante q est fournie par la densité stellaire au voisinage du Soleil et la proportion de binaires observées. On peut donc écrire le nombre N_{sp} de binaires accessibles, pour chaque type spectral :

$$N_{sp} = \int_0^{r_0} 4\pi q \cdot r^2 (a_1 - a_r) \cdot dr \quad (11, VII)$$

La distance r₀ est limitée 1) d'une part par:

$$\log r = 0,45 + \log D$$

pour les types lumineux où la limite de magnitude donne de fortes distances, 2) d'autre part, par la magnitude limite de 10 pour les types moins lumineux :

$$M = m + 5 - 5 \cdot \log r$$

On calcule, dans ces conditions, le nombre N_{sp} pour chaque type A, F, G, K, M et de classe V. Par application de (4, VII), on trouve :

dans le cas 1)

$$N_{sp} \simeq \frac{\pi \cdot q \cdot a_1^4}{3 \cdot 15^3} D^3 \quad (12, VII)$$

ce qui montre que la quantité d'informations croît comme le cube de l'ouverture. Dans le cas 2), on a

$$N_{sp} \simeq 4 \cdot \pi \cdot q \cdot r^3 (a_1/3 - 15 \cdot r/4 \cdot D) \quad (13, VII)$$

Les valeurs numériques sont données dans le tableau suivant. On y trouve le nombre de binaires d'orbites accessibles, pour différentes ouvertures, et on rappelle le nombre de binaires effectivement connu.

| D | A | F | G | K | M | Tous |
|--------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|
| 100 cm | 1 400 | 1 660 | 700 | 230 | 9 | 4 000 |
| 50 | 175 | 230 | 343 | 189 | 9 | 950 |
| connu | 66 | 139 | 106 | 50 | 21. | 382 |

On note le décalage entre ce qui est connu et ce qui est accessible. On voit que le type M est plus représenté que prévu. Cela s'explique car ces binaires sont écartées, parfois plusieurs secondes, ce qui rend leurs orbites plus aisées à obtenir et recule les limites de magnitude jusqu'à douze environ.

Il y a donc des effets de sélection observationnelle qu'on peut chercher à chiffrer en calculant, pour chaque type, le rapport R du nombre des binaires observables à celui de l'ensemble des couples. Reprenons l'équation (10, VII) et écrivons le nombre de couples dont les orbites sont observables: la sommation est comprise entre a_r et a₁, puis étendue à la sphère correspondant à la magnitude limite de dix, avec a₁ · D/15 (équat. 1, VII) comme limite supérieure :

$$\log r = 3 - M/5 \log (a_1 \cdot D/15)$$

On a:

$$n(M) = \int_0^r \int_{a_r}^{a_1} 4 \cdot \pi \cdot q(a) \cdot r^2 \cdot dr \cdot da$$

$$= \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot Q(a_1) - \int_0^r Q(a_r) \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr$$

D'autre part, si on tient compte de tous les couples dans l'intervalle $(0, a_1)$, on a :

$$N = \int_0^r \int_0^{a_1} 4\pi \cdot q(a) \cdot r^2 \cdot dr \cdot da = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot Q(a_1)$$

Le rapport R cherché est $n(M)/N$, il s'écrit :

$$R(M) = 1 - \frac{3 \int_0^r Q(a_r) \cdot r^2 \cdot dr}{r^3 \cdot Q(a_1)} = 1 - F(r) \quad (14. VII)$$

avec la condition $r \leq a_1 \cdot D/15$

Avec la condition contraire, le rapport R s'écrit

$$R(M) = [1 - F(a_1 \cdot D/15)] \cdot \frac{a_1^3 \cdot D^3}{15^3 \cdot r^3} \quad (15, VII)$$

En supposant la fonction q constante, hypothèse peu justifiée, mais raisonnable vue notre ignorance sur la loi de répartition des orbites, on trouve :

$$\begin{aligned} \log(1 - R) &= 2,05 - \log(a_1 \cdot D) + (m - M)/5 \\ &\text{pour } r \leq a_1 \cdot D/15 \\ \log R &= -7,13 + 3 \cdot \log(a_1 \cdot D) + 0,6(M - m) \\ &\text{pour } r > a_1 \cdot D/15 \end{aligned}$$

Pour les couples peu lumineux, non visibles de loin, R tend vers l'unité. Il décroît vite à mesure qu'on remonte vers les étoiles chaudes. Avec les ouvertures les plus grandes, il n'y a que le quart des couples A dont on puisse connaître l'orbite. La figure 5-VII donne le rapport R pour des ouvertures d'un mètre et de 50 cm.

RENDEMENT ORBITAL D'UN OBJECTIF

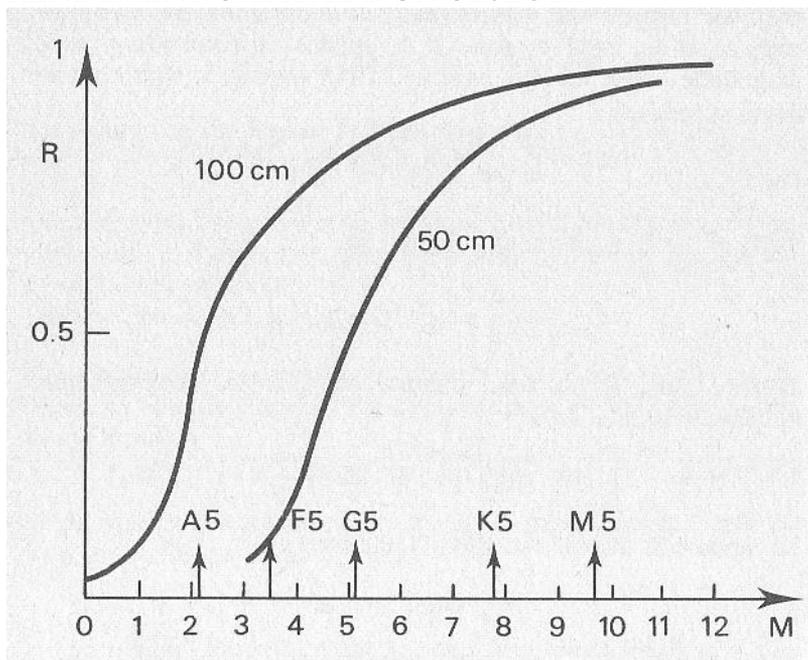


Fig. 5-VII. La figure donne, en fonction du type spectral, la fraction des couples observables de périodes inférieures à deux siècles. Avec une ouverture de 1 mètre, on peut observer la moitié des systèmes formés d'étoiles A5, mais à peine le dixième si on ne dispose que d'une ouverture de 50 cm.

En résumé :

Les trois quarts des étoiles doubles A, de demi-grand axe inférieur à 40 U.A. et d'éclat plus lumineux ou égal à la magnitude 10, sont trop serrées pour être observables;

ce rapport passe à la moitié pour le type F;
 au quart dès le type G7,
 quand on découvre une étoile double B de magnitude 10, on n'a pratiquement aucune chance d'avoir une orbite observable: quand on découvre une naine M, on est sûr d'avoir une orbite assez vite.

Performances de l'oeil comparé à ses concurrents

La pellicule photographique est plus sensible que l'oeil, mais ce dernier explore mieux une image de diffraction. On peut comparer les performances de l'oeil à celles de ses concurrents et le situer dans la gamme déjà nombreuse des récepteurs.

Pour établir une comparaison simple, choisissons le cas d'un couple de composantes égales, de deux siècles de période, de type solaire et à la limite du pouvoir séparateur s . La magnitude apparente des composantes sera. :

$$m=7,9-5.\log s$$

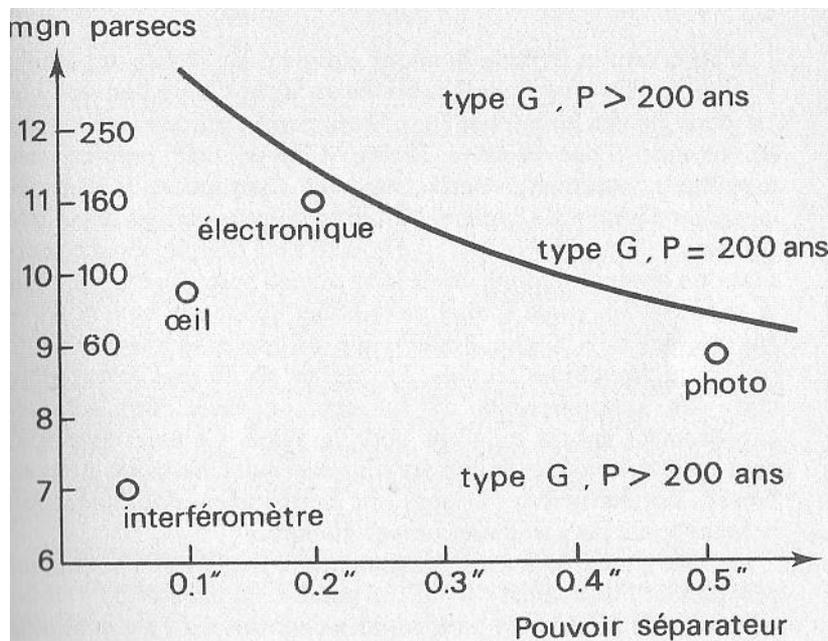


Fig. 6-VII. Le diagramme montre la limite de différents récepteurs en résolution et sensibilité. La courbe délimite les orbites de type solaire de période égale à deux siècles. L'oeil est à la fois sensible et doué d'une bonne résolution.

Cette relation délimite dans le diagramme (m, s) la région des binaires de périodes inférieures à 200 ans. Sur ce diagramme sont portés les points représentant les performances actuelles de l'oeil, de l'interféromètre, de la plaque photographique et de la plaque électronique. On en déduit le tableau récapitulatif:

| | sensibilité | résolution | rendement | trait information |
|-----------|-------------|------------|-----------|-------------------|
| oeil | non | oui | bon | pas possible |
| photo | oui | non | bon | possible |
| électron. | oui | oui | mauvais | possible |
| interfér. | non | oui | mauvais | possible |

Le voyage des astronomes niçois à bord d'un vaisseau spatial économique

L'observatoire français le mieux équipé pour l'étude des étoiles doubles se trouve sur la colline boisée du Mont-Gros à l'est de Nice. Là, deux grosses lunettes de 74 et 50 cm permettent aux astronomes de voyager d'une étoile à l'autre. Chaque nuit propice, une expédition, purement visuelle, emmène

l'astronome à quelques centaines d'années de lumière, où il se promène parmi des objets que personne n'a vus avant lui. Le kilomètre est gratuit, les accidents rares, on revient toujours, même si on se perd parmi les étoiles. Mais la conduite de l'engin spatial merveilleux qu'est une lunette ne va pas toujours sans fatigue. Rester huit à dix heures les bras en l'air, le cou tordu, les jambes arquées, à examiner six ou sept cents étoiles avec des grossissements de six cents à mille, demande un entraînement sportif excellent pour la santé. Comme pour tout cosmonaute, le voyage se prépare soigneusement, rien n'est laissé au hasard. Les découvertes ne sont que la récompense de l'exécution ponctuelle du plan minutieusement élaboré.

Comme il a été écrit au premier chapitre, Paul Muller et l'auteur prospectent l'hémisphère Nord. Le premier au nord de 55° , nous-même entre 17 et 55° . La prospection a commencé il y a une dizaine d'années. Paul Muller a exécuté presque tout son programme récoltant six cents binaires. Nous-même avons découvert mille cinq cents couples dans $6\ 500$ degrés carrés, sur les onze mille que comporte le programme.

Paul Muller prospecte les étoiles du catalogue AGK3, l'auteur examine celles du catalogue d'Argelander. Les étoiles de ce dernier recueil ont été classées sur bande magnétique à l'aide de laquelle des listes commodes pour l'observation ont été constituées par zones de deux degrés. Les couples déjà connus sont notés à l'aide de la bande magnétique de l'Index Catalogue. Ils servent de repères dans le ciel; tels des pancartes, ils indiquent qu'on est sur la bonne route.

Le tableau suivant illustre nos contributions dans l'aire céleste observée.

| | Aire observée par Paul Couteau | | Aire observée par Paul Muller | |
|------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
| | Couples déjà connus | Couples nouveaux | Couples déjà connus | Couples nouveaux |
| $\rho \leq 0",2$ | 100 | 152 | 35 | 87 |
| $\rho < 0",5$ | 450 | 472 | 200 | 244 |
| $\rho < 1"$ | 800 | 854 | 400 | 350 |

Vers les petites séparations le nombre de couples nouveaux est plus grand que le nombre de couples précédemment connus. C'est précisément les couples serrés qu'on recherche, parmi eux se trouvent les orbites rapides. D'ailleurs de nombreuses étoiles doubles jouent à cache-cache avec les observateurs, se montrant simples au moment des prospections pour paraître doubles quelque temps après. C'est le cas notamment de θ Coronae, τ Arietis, 13 Pegasi, 39 Comae, bien visibles maintenant, mais non au début du siècle. Des amateurs moyennement outillés auraient pu découvrir ces couples avant les professionnels.

Un voyage n'a d'intérêt que s'il enrichit l'expérience. Découvrir des étoiles doubles n'est pas un but en soi; il faut exploiter les régions explorées pour augmenter nos connaissances sur les lois qui régissent l'Univers.

Un total de deux mille couples nouveaux est significatif pour en tirer quelques enseignements. Dans un premier temps, nous allons trier les couples par étoiles géantes et naines, autrement dit nous allons essayer de dissocier les différentes classes spectrales. Puis nous utiliserons ces résultats pour connaître, dès la découverte d'une binaire, une valeur approchée de sa période. Nous en déduisons une liste de couples remarquables qu'il convient de garder sous surveillance constante.

Triage des étoiles doubles nouvelles en géantes et naines

Sur les $2\ 100$ couples découverts à Nice, et quelques autres ailleurs depuis une quinzaine d'années, nombre d'entre eux ont une période longue et n'ont pas de spectre connu. Il est bon d'éliminer du tri ceux qui ne nous apportent aucun renseignement utilisable, c'est-à-dire les étoiles géantes visibles de très loin, qui forment des couples pratiquement fixes au fond des cieux. Il est évident que, en moyenne, les couples serrés ont des périodes plus courtes. D'autre part, la connaissance du type spectral et du mouvement propre est fondamentale pour toute étude critique. Nous retenons donc les couples plus serrés que $0",5$ dont on connaît le spectre et le mouvement propre.

Si on fait un diagramme du mouvement propre pour chaque type d'étoiles, on constate un groupage qui fait penser à une loi gaussienne, avec une répartition moins étalée pour les types solaires. Conformément au tableau suivant, il y a, pour chaque type, un mouvement propre au voisinage duquel

les étoiles sont les plus nombreuses.

| Type | A | F | G | K |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| log m.p. annuel | — 1,90 | — 1,70 | — 1,45 | — 1,80 |

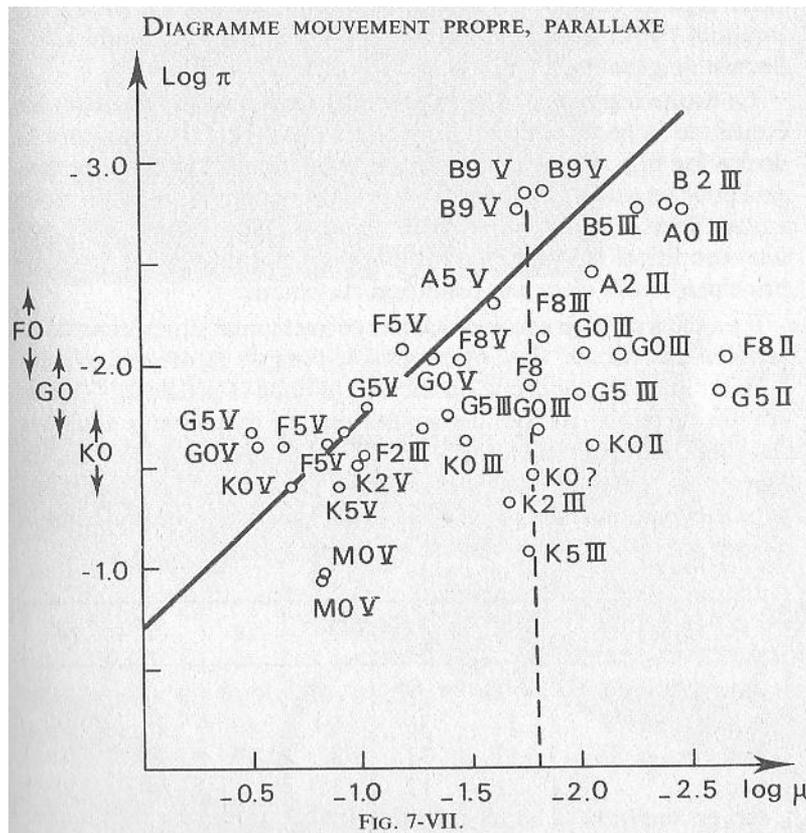
Comme, statistiquement, le mouvement propre est proportionnel à la parallaxe, le rapport de ces deux grandeurs est voisin d'une constante. On constate que, parmi les binaires découvertes, les plus proches sont de type G ou de type solaire, puis viennent celles de type F. K et A. Si on prend celles de type G pour distance unité, on trouve pour les F, les K et les A des distances de 1,8, 2,2 et 2,8. Or la magnitude moyenne apparente est à peu près la même pour l'ensemble des couples découverts. Il est donc possible d'en déduire leur différence de magnitude absolue et d'en tirer des conclusions. Les résultats sont schématisés dans le tableau suivant.

| Type | K | G | F | A |
|-------------|----------|----------|-------|-----|
| éloignement | 2,2 | 1 | 1,8 | 2,8 |
| Magn. abs. | M + 0,50 | M + 2;25 | M + 1 | M |
| III, IV, V | 2,50 | 2,90 | 2,13 | 1,2 |

La troisième ligne donne les magnitudes absolues comparées à celle du type A. La quatrième ligne montre les magnitudes absolues moyennes dans le cas où les classes III, IV et V sont également représentées. On note que le type F a la même représentation que le type A, que les étoiles G sont plus abondantes dans la série principale (classe V), mais que c'est le contraire pour les étoiles K, à cause de la grande luminosité des géantes de ce groupe, visibles de très loin.

A l'aide de ces considérations, on va montrer qu'on peut dissocier les astres de la série principale des autres.

Formulons l'hypothèse de travail que toutes les doubles nouvelles sont de la série principale et formons le diagramme portant en abscisse et ordonnée les logarithmes du mouvement propre et de la parallaxe. Dans ce graphique, les étoiles ne sont pas réparties au hasard. Il y a d'abord un clivage selon la parallaxe, parce que les magnitudes apparentes étant voisines, comprises entre 7,5 et 10, chaque type occupe une bande horizontale assez étroite en ordonnée (fig. 7-VII).



Le diagramme représente quelques étoiles à mouvements propres connus, dans l'hypothèse où elles font partie de la série principale. Les étoiles qui en font réellement partie se répartissent près de la droite en trait plein les autres assez largement autour d'une droite en pointillés. On peut ainsi trier les géantes

(classes III et IV), des naines (classe V).

On constate en effet que les étoiles A occupent une région en haut à droite correspondant aux petites valeurs du mouvement propre et de la parallaxe. Les astres F et G sont dans une large région étalée le long des mouvements propres. Quant aux K, elles se trouvent dans deux régions distinctes, l'une correspondant à la série principale marquée par de grands mouvements propres et l'autre visiblement formée de géantes.

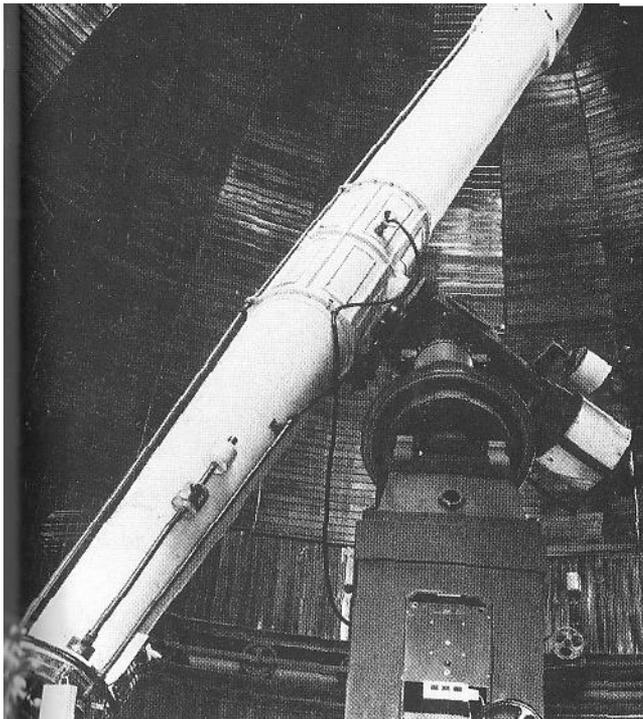
La droite $\log \text{ par.} = \log \text{ m.p.} - 0,7$ rencontre les zones où les étoiles de la série principale doivent se grouper. D'autre part la droite $\log \text{ m.p.} = - 1,8$ rencontre aussi beaucoup d'étoiles qui, sauf pour les astres très chauds, n'appartiennent pas à la branche des naines. Bien entendu, la petitesse du mouvement propre n'est pas une condition absolue pour distinguer une étoile de la série principale, mais c'est une condition statistique.

Il y a dans ce diagramme des astres correctement situés, ceux de la branche des naines, ils sont répartis le long de la droite inclinée. L'abondance vers la droite du tableau indique la présence d'étoiles géantes de faibles mouvements, elles sont de magnitudes absolues visuelles comprises entre 0,5 et 3. Ce graphique permet donc de repérer les étoiles de la série principale. Les résultats sont groupés dans le tableau suivant pour 351 couples plus serrés que $0",5$ dont le mouvement propre est connu ainsi que le type.

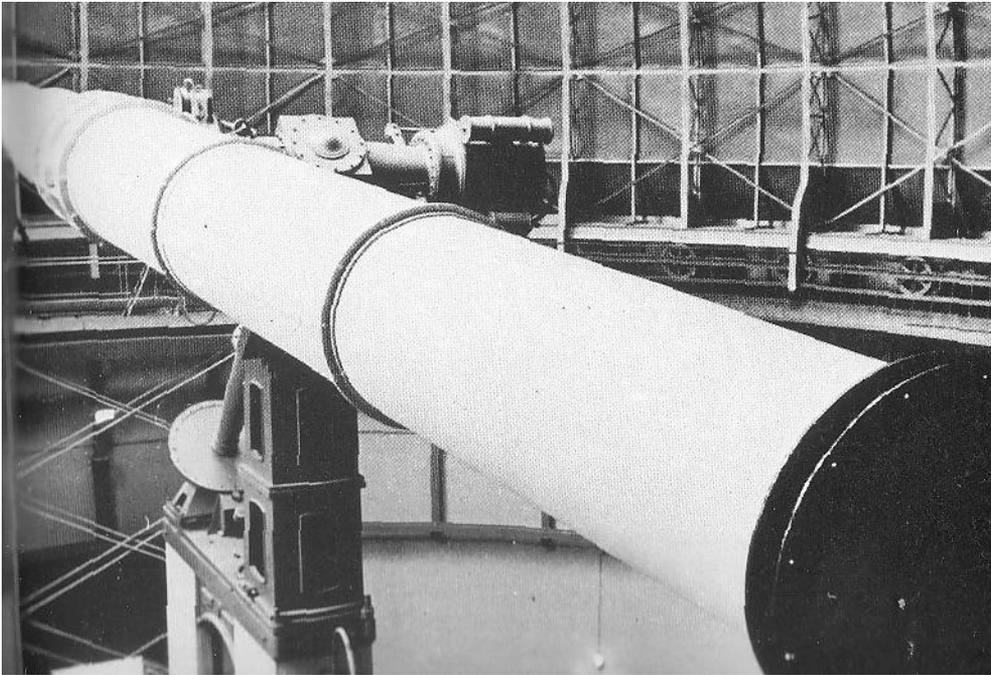
| Types | K | G | F | A | B | M |
|-------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|
| mouv. pr. ann. | 0",050 | 0",025 | 0",016 | 0",01 | 0",006 | 0",12 |
| n. étoiles cl. V | 11 | 36 | 69 | 67 | 13 | 1 |
| n. étoiles cl. IV | 11 | 31 | 32 | 13 | | |
| autres | 21 | 12 | 21 | 7 | (5) | 1 |
| sér. pr./ensem. | 0,26 | 0,46 | 0,57 | | | |

On y trouve en première ligne les types, puis le mouvement propre limite annuel correspondant à la série des naines, en troisième ligne le nombre probable d'étoiles de classe V, puis dans les autres classes. On voit que le quart seulement des binaires nouvelles de type K appartient à la classe du Soleil, ce rapport est voisin de la moitié pour les types G et F.

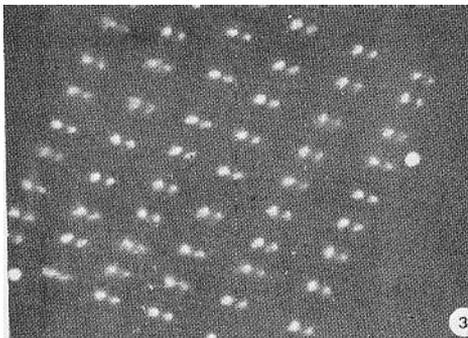
Mais il est important de noter que les étoiles M ou K de la série principale, observées comme doubles visuelles ont des mouvements propres présumés rapides, conformément à de grandes parallaxes probables. Ces binaires nouvelles auront des orbites connues avant les autres.



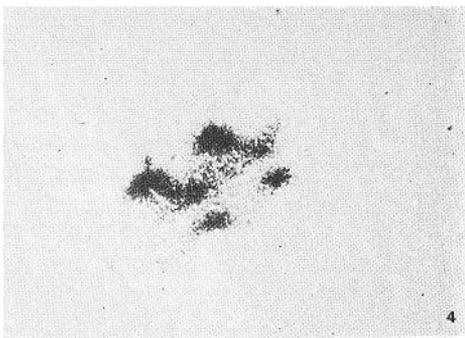
6 — Observatoire de Nice. Lunette de 50 cm. Distance focale 7.50 m. Objectif A. Couder, taillé par J. Texereau mis en service en 1967. Cliché Observatoire de Nice



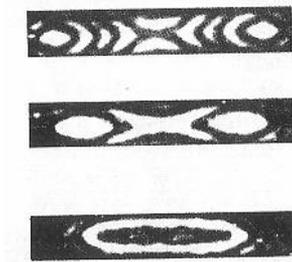
7 — L'objectif de 74 cm de la grande lunette de l'Observatoire de Nice vient d'être monté au bout du tube de 18 murs. Le personnage à l'extrême gauche donne l'échelle. Cliché Observatoire de Nice



8 — Plaque électronique Ilford G 5 portant des séries d'images d'étoiles doubles visuelles. On voit à droite et à gauche du champ de la plaque, les deux petites taches qui servent de repère pour la détermination du zéro de l'échelle des angles de position. (Photo et légende de P. Laques.)



9 — Image agrandie d'une étoile de faible Δm et de séparation de l'ordre de $0''9$. On voit ici deux granules bien résolus qui permettent une mesure astrométrique aisée. (Photo et légende de P. Laques.)



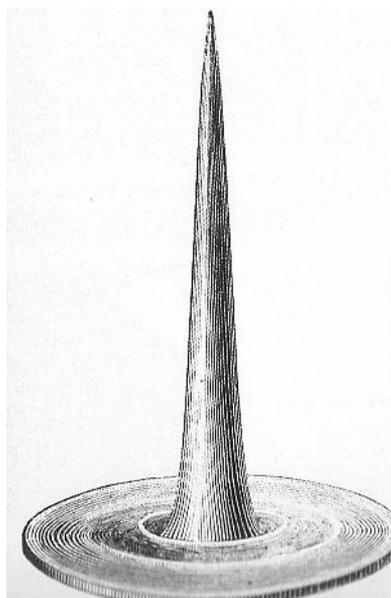
10 — Isophotes du centre de la tache de diffraction d'une étoile double non résolue à composantes égales. Cliché C.D.C.A.

On voit l'évolution considérable de l'aspect théorique de la tache entre $0,9.r$ et $0,8.r$.

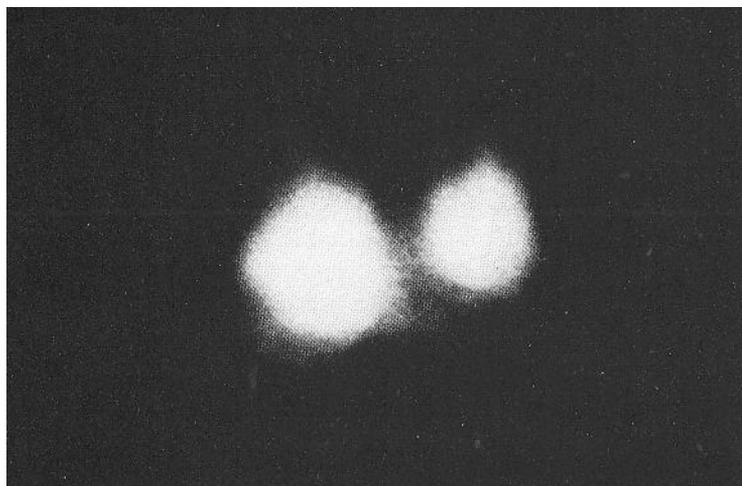
a) Pour $0,9.r$ ($0'',504$ pour une ouverture de 25 cm) les photocentres sont bien séparés.

b) Pour $0,85.r$ ($0'',476$ pour une ouverture de 25 cm) les photocentres sont encore nets.

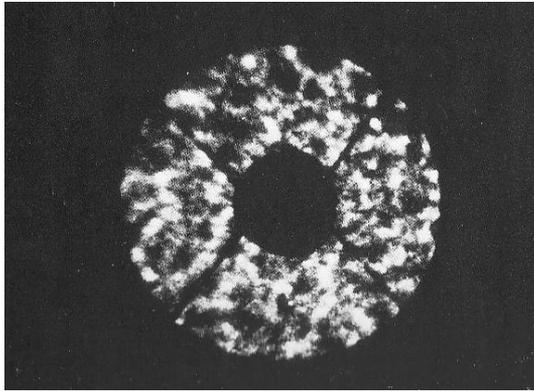
e) Pour $0,79.r$ ($0'',442$ pour une ouverture de 25 cm) on ne voit plus qu'un allongement considérable du centre.



11 — Solide de diffraction. Les hauteurs sont proportionnelles à l'éclairement. On note l'intensité du pic central.



12 — Photographie d'une étoile double. ADS 2799 = $O\Sigma 65\ 3\ h\ 47\ m\ 3 + 25^\circ 26'$ (1950). Lunette de 50 cm. pose 1 s 1967.818 $203^\circ,9\ 0'',65\ 6,5-6,8$. Foyer porté à 22.5 m agrand. X 300 72 microns de centre à centre. Obs de Nice. cliché E. bossai.



13 — Photographie des ombres volantes. Elles sont ici photographiées au télescope de 152 cm de l'Observatoire de Haute-Provence par F. Marlin et J. Borgnino (Université de Nice). Pose un millième de seconde, avec amplificateur de brillance, facteur 80 000. Film Tri X. En l'absence de turbulence, on verrait une plage uniformément claire. Noter la silhouette du miroir secondaire (montage Cassegrain) et celle du support du miroir.

210
 Ven. jeudi 2 octobre 1975 = 1975, 752
 Amorceux peu actifs.
 Moins bon que milieu
 de la nuit.

COU 1161 19.28.6 + 28.10
 8.5.8.5
 -30
 15.2
 17.2 1' / m
 22.8
 18.1 18.3 18: 0'14

8me très douteux
 8.7-8.7 4
 out gênant.

COU 1324 20.26.5 + 31.08
 9.8-10.2
 -1.20
 36.0
 38.0 3' / m
 41.4
 43.7 40.46
 43.2 220.5
 202.3

9.4-9.6
 8me 4+ Brip

COU 1318 20.04.3 + 31.39
 9.3-9.3
 -55
 89.6
 87.1 1' / m
 92.7 89.5
 88.6 90: 0'14

9.1-9.1
 out bien double
 Difficile 8me
 4.9

Examen AGK.2 21.21.7

| | |
|-------------------|---------------------|
| AGK2 + 31.2019 4+ | AGK2 + 31.2023 4+ |
| 31.2020 | 31.2024 |
| 29.2321 | 30.2123 |
| 29.2322 | 30.2124 |
| 30.2121 | 31.2025 |
| 31.2021 | 31.2026 |
| 31.2022 | 31.2027 |
| 19.2323 | 19.2326 |
| 20.2122 | 19.2327 |
| 19.2324 | 30.2125 d(c-i-dans) |
| 19.2325 | 30.2126 |

AGK2 + 30.2125 (108) = COU 1337 20.23.6 + 30.12

| | | | | |
|------|--------|------|-------------|-----------|
| 26.0 | 3' / m | 2050 | 797 195 992 | 10.0-12.0 |
| 23.4 | | | 817 182 979 | d(2) |
| 25.8 | 25.0 | | 818 181 979 | 1' 17 |
| 24.6 | | | 186 2' 56 | 30.0 |

8590x
 179x

14 — Une page du registre d'observation à la lunette de 50 cm.

La page ci-contre donne d'abord les détails de la mesure de trois couples COU. Ils sont identifiés par leur numéro provisoire (COU 1161), les magnitudes au moment de la découverte (8,5-8.5), les coordonnées célestes en milieu de ligne. Sous les magnitudes on trouve l'écart au méridien, ou angle horaire, en minutes et heure. On lit une série de quatre ou cinq mesures d'angles de position, puis la moyenne et l'indication du quadrant. Les séparations sont estimées, car les couples sont très serrés : 0",14 à 0",28. En bout de ligne on trouve d'autres indications : l'oculaire utilisé, ici huit millimètres ce qui correspond à un grossissement de 938, les magnitudes estimées, une estimation de l'état des images 4 à 4,5 ce qui correspond à de très bonnes images dans l'échelle de 0 à 5. On trouve quelques brèves notes.

Dans la deuxième partie de la page se trouve un examen d'étoiles du catalogue AGK2. Sur ces 22 étoiles examinées, une double nouvelle est notée dans la mesure suit. On s'assure de la bonne identification par un repérage d'une étoile voisine.

Les observations de cette nuit du 2 octobre ont couvert onze pages totalisant 32 mesures, l'examen de 407 étoiles et la découverte parmi elles de 9 couples.

Temps de révolution probable d'une étoile double

Il est facile de préciser ce dernier point, en écrivant une équation qui donne la période probable d'un couple en fonction des éléments observés au moment de la découverte.

Reprenons l'équation (57, VI), remplaçons la parallaxe par son expression en fonction des magnitudes absolues et visuelles et explicitons la période; on arrive à :

$$\log P = \frac{3}{2} \cdot \log a'' + M_A \left(\frac{k}{2} - 0,3 \right) - 0,5 \cdot \log D$$

$$+ 0,3(m_{vA} + C_{vA}) - \frac{k}{2} M_{\odot} + \frac{3}{2}$$

ou encore en remplaçant les symboles par leurs valeurs (chap. VI) :

$$\log P \simeq 1,5 \cdot \log a'' - 0,244 \cdot M_A$$

$$+ 0,3(m_{vA} + C_{vA}) + 0,028 \cdot \Delta m + 1,08 \quad (16, VII)$$

Cette équation donne la période en fonction des éléments observés et du demi-grand axe apparent, à condition que l'étoile obéisse à la relation Masse-Luminosité.

Comme on cherche des ordres de grandeur, on peut associer, au demi-grand axe apparent, la séparation au moment de la découverte par :

$$a'' = g \cdot \rho$$

et on écrit :

$$\log P \simeq 1,5 \cdot \log \rho - 0,244 \cdot M_A + 0,028 \cdot \Delta m$$

$$+ 0,3(m_{vA} + C_{vA}) + h \quad (17, VII)$$

en posant : $h = 1,08 + 1,5 \cdot \log g$

La valeur de h varie au cours de la période. On peut calculer sa valeur moyenne pour chaque couple, elle n'est pas très éloignée de 1,5. Étendue à l'ensemble des binaires, cette valeur moyenne dépend de la loi de répartition des éléments, spécialement de l'excentricité et de l'inclinaison. Comme ces lois sont mal connues, on détermine h en appliquant l'équation (17, VII) aux étoiles doubles d'orbites connues. Mais ces dernières sont le résultat d'une sélection qui modifie la valeur moyenne de h, il faut tenir compte d'un grand nombre dont la période et le grand axe sont statistiquement connus. C'est un assez long travail dont le résultat est résumé dans le tableau ci-contre.

| Type (cl V) | A5 | FO | F5 | GO | G5 | KO | K5 | MO | M2 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| h | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,30 | 1,40 | 1,50 | 1,60 | 1,70 | 1,90 |

La variation de h avec le type vient de la sélection observationnelle. Elle signifie qu'un couple A ou F est, en moyenne, plus loin du périastre qu'un couple K ou M au moment de sa découverte. L'écart probable sur ces valeurs est de $\pm 0,13$. Cet écart vient de la valeur quelque peu aléatoire de h. La période

ainsi calculée est une période probable. La période réelle a une chance sur deux de se trouver comprise entre $0,75 \cdot P$ et $1,4 \cdot P$.

Grâce à l'équation (17, VII), on peut savoir dès la découverte la rapidité du mouvement orbital, guider la fréquence d'observation et faire un choix de couples à courtes périodes probables, dignes d'une surveillance annuelle. D'ailleurs les considérations précédentes permettent de supposer la classe spectrale qui détermine la magnitude absolue, le type étant connu.

Le tableau suivant concerne la série principale. Il facilite le calcul des périodes probables et est formé à partir des données de J. C. Pecker et E. Schatzman (Astrophysique générale, Masson, 1959). On y trouve le type spectral, la magnitude absolue bolométrique, la masse μ selon la relation Masse-Luminosité de Baize-Romani (chap.VI) et le terme $(k/2 - 0,3)M$ qui sert au calcul de la période probable, avec la valeur $k = 0,1117$.

Enfin la petite table suivante permet de calculer la magnitude de la composante A en fonction de la différence de magnitude Δm et de la magnitude totale visuelle

$$m_A = m_V + d$$

| Δm | d |
|------------|-----|
| 0 | 0,7 |
| 0,2 | 0,6 |
| 0,4 | 0,6 |
| 0,6 | 0,5 |
| Δm | d |
| 0,8 | 0,4 |
| 1,0 | 0,3 |
| 1,2 | 0,2 |
| 1,5 | 0,2 |

Exemples :

1. Couple d'orbite connue. ADS 8325 = Hu 731 11 h 49 m 4 + 48°22' (1950)

magn. vis. totale 8,6 $\Delta m = 0,2$ Sp KO d'où $M = 6,0$ Sépar. à la découv. 0",34 $m_{VA} + C_{VA} = 9,1$

D'après le tableau $h = 1,50$

d'où Pprob. 117 ans.

La période réelle est 107 ans.

2. Couple d'orbite inconnue, mais de mouvement sensible. ADS 1273 = A 944 AB 1 h 35 m 0 + 45°45' (1950) magn. vis. totale 8,2 $\Delta m = 0,3$

mouv. propre 0",015 Sp AO donc classe V probable

$m_{VA} + C_{VA} = 8,4$ $M_A = 0,3$

Sépar. à la découv. 0",44

Le tableau donne $h = 1,25$

d'où Pprob. 1 500 ans.

Le couple a parcouru vingt degrés en 65 ans.

3. Couple découvert en 1971. Muller 224 19 h 40m 7 + 76°18' (1950)

magn. vis. totale 8,0 $\Delta m = 0,7$

mouv. propre 0",20 Sp KO donc classe V; $M_A = 6,0$

$m_{VA} + C_{VA} = 8,2$ Séparation 0",17 $h = 1,50$

d'où Pprob 23 ans.

SÉRIE PRINCIPALE

| Spectre | M | μ | $(k/2 - 0,3)M$ |
|---------|-------|-------|----------------|
| B7 | - 0,6 | 3,98 | + 0,15 |
| B8 | - 0,3 | 3,68 | + 0,07 |
| B9 | 0 | 3,41 | 0 |
| A0 | + 0,3 | 3,16 | - 0,07 |
| A1 | 0,9 | 2,71 | - 0,22 |
| A2 | 1,3 | 2,50 | - 0,29 |
| A3 | 1,7 | 2,15 | - 0,44 |
| A4 | 2,0 | 2,04 | - 0,49 |
| A5 | 2,2 | 1,94 | - 0,54 |
| A6 | 2,4 | 1,84 | - 0,59 |
| A7 | 2,6 | 1,75 | - 0,63 |
| A8 | 2,8 | 1,66 | - 0,68 |
| A9 | 2,9 | 1,62 | - 0,71 |
| FO | 3,1 | 1,58 | - 0,73 |
| F1 | 3,2 | 1,50 | - 0,78 |
| F2 | 3,3 | 1,46 | - 0,81 |
| F3 | 3,4 | 1,42 | - 0,83 |
| F4 | 3,5 | 1,39 | - 0,85 |
| F5 | 3,6 | 1,35 | - 0,88 |
| F6 | 3,8 | 1,28 | - 0,93 |
| F7 | 3,9 | 1,25 | - 0,95 |
| F8 | 4,1 | 1,19 | - 1,00 |
| F9 | 4,2 | 1,16 | - 1,02 |
| GO | 4,4 | 1,10 | - 1,07 |
| Spectre | M | μ | $(k/2 - 0,3)M$ |
| G1 | 4,5 | 1,07 | - 1,10 |
| G2 | 4,7 | 1,02 | - 1,15 |
| G3 | 4,8 | 0,99 | - 1,17 |
| G4 | 5,0 | 0,94 | - 1,22 |
| G5 | 5,1 | 0,92 | - 1,24 |
| G6 | 5,3 | 0,87 | - 1,29 |
| G7 | 5,5 | 0,83 | - 1,34 |
| G8 | 5,6 | 0,81 | - 1,37 |
| G9 | 5,8 | 0,77 | - 1,42 |
| KO | 6,0 | 0,73 | - 1,46 |
| K1 | 6,2 | 0,69 | - 1,51 |
| K2 | 6,5 | 0,66 | - 1,56 |
| K3 | 6,9 | 0,58 | - 1,68 |
| K4 | 7,2 | 0,54 | - 1,76 |
| K5 | 7,5 | 0,46 | - 1,83 |
| K6 | 7,9 | 0,45 | - 1,93 |
| K7 | 8,2 | 0,41 | - 2,00 |
| K8 | 8,5 | 0,38 | - 2,07 |
| K9 | 8,9 | 0,35 | - 2,17 |
| MO | 9,2 | 0,32 | - 2,24 |
| M1 | 9,7 | 0,28 | - 2,37 |
| M2 | 10,1 | 0,25 | - 2,46 |
| M3 | 10,6 | 0,22 | - 2,59 |
| M4 | 11,3 | 0,19 | - 2,76 |

Grâce aux tableaux précédents et à celui du chapitre VI qui donne les corrections bolométriques, il est aisé d'appliquer l'équation (17, VII) à n'importe quel couple et à n'importe quel moment, par exemple celui de sa découverte.

On remarque, en premier lieu, que seuls les couples très serrés ont des chances d'être à courtes périodes. C'est donc parmi eux qu'on les recherchera. L'importance de la magnitude est grande, de même importance que le type spectral. Les couples à hautes températures, en tête de la série principale, ont des périodes plus longues, toutes choses égales d'ailleurs, que les naines rouges.

Le tableau suivant est une sélection de quelques couples à courtes périodes probables. Ils ont été découverts récemment. Le tableau donne, en première colonne, le nom du couple et son numéro d'ordre : COU = P. Couteau, Mlr = P. Muller, WOR = C. E. Worley. On trouve ensuite la magnitude visuelle totale fournie par le catalogue S.A.O., puis la position sur le ciel avec l'équinoxe 1950. Le spectre est ensuite indiqué, la classe n'est pas connue, mais le mouvement propre de tous ces couples est tel qu'ils sont sûrement formés de naines ordinaires, sauf COU 14, géante de classe III, déjà connue comme telle. Les dernières colonnes concernent la séparation ρ au moment de la découverte, dont l'année est indiquée, enfin on trouve la période probable, puis la période observée selon l'arc parcouru. Les périodes en caractères gras sont celles d'orbites déjà calculées, tandis que les valeurs entre parenthèses sont peu sûres.

Cette liste met en évidence le grand nombre de découvertes Intéressantes qui restent à faire, elles apporteront une contribution essentielle à la calibration de la relation Masse-Luminosité.

La pérennité des observations. Appel aux monastères

L'univers des étoiles doubles permet une adaptation à leur étude en fonction de la puissance des instruments. Bien sûr la recherche de couples nouveaux, comme la mesure des binaires serrées, sont réservées aux grandes ouvertures. Mais de nombreuses étoiles doubles peuvent être suivies avec des instruments moyens ou même modestes, comme Castor, γ Virginis, ζ Cancr... L'amateur trouvera toujours un choix, ses observations bien faites seront utiles ce n'est pas forcément le désir de faire oeuvre de science qui doit guider l'amateur, mais bien l'amour de l'observation. Il travaille surtout pour lui, en artiste.

BINAIRES RÉCEMMENT DÉCOUVERTES À COURTES PÉRIODES PROBABLES

| Nom | mvT | α 1950 δ | Sp | ρ | Découv. | Pprob. | Pobs. |
|----------|-----|------------------------|-------|--------|---------|--------|----------|
| COU 854 | 8,3 | 0h58m,6 + 35°19' | F8V | 0",17 | 1972 | 55 ans | (60) ans |
| COU 1067 | 8,5 | 2 06 ,0 + 35 26 | F5V | 0 ,15 | 1973 | 68 | |
| COU 79 | 5,6 | 2 12 ,9 + 24 49 | F5V | 0 ,25 | 1965 | 18 | 37 |
| COU 1371 | 8,8 | 2 37 ,8 + 38 52 | F2V | 0 ,17 | 1975 | 40 | |
| COU 691 | 8,5 | 3 39 ,1 + 31 31 | F8V | 0 ,14 | 1972 | 47 | |
| COU 929 | 7,5 | 7 53 ,1 + 23 50 | GOV | 0 ,18 | 1973 | 34 | (30) |
| COU 169 | 9,6 | 10 11 ,3 + 22 42 | K5V | 0 ,19 | 1967 | 36 | 85 |
| COU 292 | 8,0 | 10 24 ,2 + 19 46 | F8V | 0 ,19 | 1968 | 49 | 43 |
| COU 1260 | 9,0 | 11 19 ,4 + 37 21 | GOV | 0 ,18 | 1975 | 30 | |
| WOR 24 | 9,4 | 13 29 ,7 + 31 25 | MOV | 0 ,36 | 1960 | 29 | 36 |
| COU 606 | 9,4 | 14 11,6 + 31 14 | MOV | 0 ,18 | 1971 | 10 | 35 |
| Mlr 347 | 8,8 | 15 32 ,4 + 84 41 | KOV | 0 ,17 | 1972 | 48 | (45) |
| COU 798 | 8,6 | 15 32 ,6 + 27 05 | GOV | 0 ,16 | 1972 | 65 | |
| COU 612 | 8,0 | 15 36 ,9 + 25 54 | G5V | 0 ,15 | 1971 | 32 | 33 |
| COU 613 | 8,6 | 15 38 ,6 + 31 38 | G5V | 0 ,27 | 1971 | 101 | (108) |
| COU 1445 | 7,5 | 15 40 ,2 + 42 13 | F8V | 0 ,22 | 1976 | 49 | |
| COU 490 | 8,5 | 16 43 ,0 + 29 33 | F5V | 0 ,15 | 1972 | 68 | (72) |
| Mlr 182 | 8,4 | 16 45 ,3 + 71 51 | G5V | 0 ,22 | 1971 | 65 | (106) |
| COU 1289 | 7,8 | 16 56 ,7 + 39 47 | GOV | 0 ,14 | 1975 | 30 | |
| COU 1291 | 8,5 | 17 05 ,8 + 38 14 | G5V | 0 ,14 | 1975 | 43 | (10) |
| COU 1145 | 7,1 | 17 47 ,2 + 37 05 | GOV | 0 ,15 | 1974 | 21 | (27) |
| COU 1462 | 9,1 | 19 07 ,1 + 33 59 | K6V | 0 ,20 | 1976 | 21 | |
| COU 321 | 7,9 | 19 15 ,8 + 20 06 | A5V | 0 ,16 | 1968 | 111 | 60 |
| Mir 224 | 8,0 | 19 40 ,7 + 76 18 | KOV | 0 ,17 | 1971 | 23 | (36) |
| COU 14 | 5,3 | 21 47 ,8 + 17 04 | F21II | 0 ,36 | 1959 | 75 | 31 |
| COU 542 | 8,5 | 22 54 ,6 + 24 25 | KOV | 0 ,20 | 1970 | 49 | 44 |
| Mlr 4 | 7,2 | 23 38 ,7 + 45 58 | F5V | 0 ,12 | 1953 | 20 | 20 |

Beaucoup d'instruments de petites ou moyennes dimensions existent dans les clubs d'amateurs, ou dans des observatoires privés. Nonobstant, il est rare que des mesures d'étoiles doubles soient prises par des amateurs, qui semblent rechercher les performances photographiques plutôt que visuelles. Si bien que les mesures d'étoiles doubles sont pratiquement réservées aux professionnels. Encore sont-ils très peu nombreux à s'y consacrer.

Il est étonnant que sur quatre milliards d'êtres humains, pas plus de six ou sept mesurent régulièrement des binaires. Certes il faut des instruments disponibles, puissants, sous un ciel favorable. Ces conditions se rencontrent pourtant dans presque tous les pays. La France a toujours été à l'avant-garde, avec la Russie du XIXe siècle, et les États-Unis d'Amérique où se trouvent les plus grandes lunettes. L'Afrique a également beaucoup contribué. Mais les jeunes sont davantage attirés par les recherches très diverses de l'astrophysique, au détriment de l'astronomie de position où il faut aimer la continuité et la persévérance.

La relève des observateurs n'est pas automatiquement assurée. Tel observatoire orienté vers l'étude des étoiles doubles, par suite de la personnalité d'un astronome, peut fort bien abandonner ce genre de recherche et se tourner vers une autre spécialité. On pourrait confier ce travail à certains observatoires à statuts particuliers. En Angleterre plusieurs ecclésiastiques ont laissé un nom dans l'astronomie des étoiles doubles, comme le Révérend T. E. Espin qui avait un observatoire privé.

En France, il y eut au début du siècle, à Hem, près de Lille, l'observatoire de R. Jonckheere où plus de mille couples furent découverts avec une lunette de 35 cm. Cette installation est devenue le Laboratoire d'Astronomie de l'université de Lille et ne contribue plus aux mesures d'étoiles doubles. Des observatoires nationaux ont même confié des instruments importants à des amateurs, ce fut une pratique courante aux États-Unis. Le Docteur P. Baize, médecin de son état, a ainsi pris plus de vingt mille mesures aux lunettes de trente et trente-huit centimètres de Paris, jusqu'à sa retraite et son retour en sa Normandie natale.

L'observatoire de Nice est le seul établissement français où des astronomes se consacrent entièrement à l'observation des étoiles doubles. Il n'est pas sûr que plus tard il en soit ainsi, car les programmes scientifiques dépendent de conseils sensibles aux modes nouvelles, aimant le changement et méconnaissant parfois le passé.

L'étude des étoiles doubles exige des observations continues, poursuivies pendant des siècles. Elle dépasse le cadre d'une vie humaine, mais non d'un groupe qui se consacre à une oeuvre et demeure stable à travers le temps. La pérennité des observations pourrait être ainsi assurée. Et cela d'autant mieux que la maintenance d'une lunette, même importante, est peu onéreuse, et que l'observation visuelle est gratuite, elle ne consomme rien.

De tels groupes existent, par exemple dans les monastères. Il en est de remarquablement situés, où une bonne lunette trouverait un refuge et une utilisation sûrs, sous une coupole construite à proximité ou dans l'enceinte de l'établissement, financée par des mécènes. Il pourrait y avoir un ou deux moines astronomes, dont la formation exigerait des stages de courte durée dans des observatoires. Une bibliothèque restreinte, une ou deux calculatrices électroniques de poche, d'un prix modique, complèteraient l'équipement scientifique. L'observation astronomique est une activité typiquement monastique, elle nourrit la méditation et fortifie la spiritualité.

NOTES BIBLIOGRAPHIQUES

La bibliographie est contenue dans celle des chapitres précédents, il convient d'ajouter :

P. COUTEAU. — État actuel sur la découverte des étoiles doubles visuelles. Sciences. Revue de l'association française pour l'avancement des sciences, t. II, n° 4, p. 242, 1971.

P. COUTEAU. — La mesure des étoiles doubles visuelles. Astrophysics and Space Science, 11, p. 7, 1971.

P. COUTEAU. — Contribution à l'étude du dénombrement des étoiles doubles visuelles. J. des Obs., 43, n° 3, p. 41, 1960.

P. COUTEAU. — La Recherche d'étoiles doubles. Sa motivation. Astr. and Astrop, 13, p. 345, 1971.

P. CouTeau. — La Recherche d'étoiles doubles. Sa motivation. Astr. and Ascoli., 13, p. 345, 1971.

W. D. HEINTZ. — A statistical study of binary stars. The Journal of the royal astronomical society of Canada, 63, n° 6, p. 275. 1969.

Les étoiles découvertes par l'auteur actuellement au nombre de 1 500 sont publiées en quatorze séries

1ere série J. des Obs. 49, N° 6, p. 220, 1966. COU 34 à 72

2e série J. des Obs. 50, f. 1 p. 33, 1967. COU 73 à 145
 3e série J. des Obs. 51, f. 1 p. 31, 1968. COU 146 à 245
 4e série A & A S.S. 1, p. 105 1970. COU 246 à 345
 5e série A & A S.S. 1, p. 419 1970. COU 346 à 445
 6e série A & A S.S. 5, p. 167 1972. COU 446 à 545
 7e série A & A S.S. 6, p. 177 1972. COU 546 à 645
 8e série A & A S.S. 6, p. 419 1972. COU 646 à 745
 9e série A & A S.S. 10, p. 273 1973. COU 746 à 845
 10e série A & A S.S. 12, p. 137, 1973. COU 846 à 945
 11e série A & A S.S. 15, p. 253, 1974. COU 946 à 1045
 12e série A & A S.S. 20, p. 379, 1975. COU 1046 à 1200
 13e série A & A S.S. 24, p. 495, 1976. COU 1201 à 1350
 14e série Sous presses COU 1350 à 1500

Les étoiles découvertes par P. Muller. au nombre de 565 actuellement sont publiées comme suit :

P. MULLER. — Résultats préliminaires d'une recherche systématique d'étoiles doubles nouvelles entre + 60° et le pôle Boréal. Pub/. Obs. Paris, juin 1973.

On y trouve les 407 premiers couples. Les autres sont parus dans les Circulaires d'Information de la Commission des Étoiles Doubles de l'Union Astronomique Internationale.

Circ. N° 60 juillet 1973. Mlr 408 à 430

Circ. N° 61 nov. 1973. Mlr 431 à 479

Circ. N° 62 mars 1974. Mlr 480 à 499

Circ. N° 64 janvier 1975. Mlr 500 à 522 Circ. N° 67 nov. 1975. Mlr 523 à 542 Circ. N° 70 nov. 1976. Mlr 543 à 565

Les astronomes yougoslaves ont découvert récemment 120 étoiles doubles à la lunette de 65 cm de l'observatoire de Belgrade : G. M. Popovic. — The First General catalogue of double stars observations made in Belgrade 1951-1971. Pub. Obs. Belgrade, n° 19, 1974.

CHAPITRE VIII
CATALOGUE
DE 744 ÉTOILES DOUBLES
POUR INSTRUMENTS DE TOUTES DIMENSIONS

Pourquoi un catalogue?

Le spectacle d'une étoile double dans une lunette ne laisse jamais indifférent. Des milliers de couples d'étoiles s'offrent à chaque instrument. L'amateur a tout le choix, tant pour satisfaire sa curiosité et son amour de l'observation que pour contrôler sa vue et la qualité de son outillage.

Mais encore faut-il disposer de catalogues adéquats, ni trop encombrants, ni trop minces où l'observateur peut trouver, chaque nuit de l'année, des objets de difficulté proportionnée à ses moyens. De tels catalogues ont été publiés dans le passé, notamment aux États-Unis. En France, on trouve des listes d'étoiles doubles classées par constellations dans l'ouvrage de C. Flammarion *Les Étoiles et les Curiosités du ciel* (1882, C. Marpon & E. Flammarion). Mais cet ouvrage est devenu difficile à trouver et il a vieilli. L'auteur y donne une description de chaque couple visible dans les instruments de l'époque, avec une estimation des couleurs par comparaison avec celles des pierres précieuses. Les catalogues modernes sont moins poétiques, mais la sèche technique n'est pas un obstacle au lyrisme et au rêve.

En France, on trouve des listes d'étoiles doubles sous la plume de P. Baize, dans les annuaires Flammarion. Malheureusement ces ouvrages paraissent maintenant sous une forme plus condensée dont les étoiles doubles sont exclues. Signalons aussi la série d'articles parus dans le *Bulletin de la Société astronomique de France*, sous le titre : « La Revue des Constellations ». Ces articles ont été réunis en une plaquette et publiés par la Société. Récemment P. Muller a publié une liste d'étoiles doubles pour amateurs, dans le même bulletin (juillet 1976). On y trouve 76 objets parmi les plus intéressants du ciel, agrémentés de notes et commentaires judicieux.

Mais les télescopes de 25 à 30 cm d'ouverture se répandent de plus en plus, ils permettent un éventail énorme d'observations. Il faut donc mettre à la disposition de leurs utilisateurs de vrais catalogues où ils pourront choisir.

Le but de ce répertoire est double : fournir une liste complète des couples les plus lumineux, afin de les repérer facilement, donner des écartements précis afin de pouvoir contrôler les distances focales par la photographie. En effet, l'amateur est de plus en plus photographe; s'il veut faire oeuvre utile il lui faut étalonner son champ, les étoiles doubles écartées largement lui fournissent à merveille cet étalonnage.

Description du catalogue

On y trouve 744 objets ordonnés par ascensions droites croissantes. Les différentes colonnes donnent:

1. Un numéro d'ordre. Dans le cas d'un couple remarquable, un astérisque précède le numéro:
2. le nom du couple comme étoile double selon les abréviations en usage au fichier central de Washington. On note ci-contre les principales.

| | | | |
|--------|---------------|-----|----------------|
| A | R. G. Aitken | Hu | W. J. Hussey |
| BU | S. W. Burnham | I | R. T. A. Innes |
| COU | P. Couteau | KUI | G. P. Kuiper |
| Da | W. R. Dawes | Mlr | P. Muller |
| h et H | W. Herschell | STF | W. Struve |
| Ho | G. W. Hough | STT | O. Struve |

3. éventuellement le nom de l'étoile dans sa constellation,
4. les coordonnées pour l'équinoxe 1950, en dixièmes de minute de temps,
5. les magnitudes visuelles des composantes. Sauf quelques rares cas, les primaires sont plus lumineuses que la magnitude 8, les secondaires que la magnitude 10,
6. les angles de position arrondis au degré,
7. les séparations,
8. l'année correspondante. Parfois ces résultats sont remplacés par une éphéméride calculée à partir d'une orbite,
9. éventuellement un renvoi à des notes explicatives.

Ces notes donnent, quand il y a lieu, les premières mesures et des éphémérides afin d'ajuster, par extrapolation, les séparations à la date d'observation. Beaucoup de ces couples n'ont encore présenté qu'un mouvement insignifiant depuis leur découverte. On y trouve, en particulier, les couples sélectionnés par P. Muller dans sa liste de « Nouvelles Distances fondamentales d'étoiles doubles » (J.O. p. 1, 1949). Nous avons fait aussi une telle liste pour les couples très serrés (Astron. et Astrop., p. 126, 1969), mais ils sont, en général, hors de portée des instruments d'amateurs. Les séparations ont été déterminées avec un soin minutieux afin de permettre un contrôle rigoureux de l'étalonnage du champ.

Les notes donnent quelquefois des indications sur les couleurs, telles que C. Flammarion les a décrites, et sur les ouvertures minimales souhaitées pour bien voir le couple.

Conseils aux observateurs

Beaucoup d'étoiles de la liste sont visibles à l'oeil nu et leur pointage ne présente pas de grandes difficultés. Mais l'amateur ne dispose pas toujours d'une monture équatoriale avec cercles gradués. Dans ce cas il faut une grande habitude de son instrument, assortie de quelques précautions.

Une carte céleste rendra les plus grands services, on pointera les étoiles invisibles à l'oeil nu à l'aide d'alignements qui se recoupent, après les avoir portées sur la carte grâce aux coordonnées. Cela est plus facile avec une lunette. Il est recommandé de fixer à sa monture azimutale des cercles gradués en azimut et hauteur. Pour pointer une étoile dans ces conditions, on note l'heure de passage au méridien d'une étoile brillante, puis on détermine les angles horaires des étoiles doubles, toujours au voisinage du méridien; en affichant la hauteur ($\delta + L$) où L est le complément à 90° de la latitude du lieu, on verra l'astre cherché par un léger balayage.

L'auteur en parle en connaissance de cause, car durant les vacances d'été, il n'est plus qu'un amateur d'astronomie comme les autres, muni d'une lunette de 10 cm à monture azimutale sans chercheur. Malgré cela, avec un peu de patience, les étoiles doubles se présentent à l'oculaire, certaines sont même loin d'être visibles à l'oeil nu.

Avec un miroir de 40 cm presque tous les objets de la liste sont accessibles et bien d'autres que nous n'avons pas mentionnés. Si l'amateur bien outillé veut aller plus loin, il lui faut une documentation d'observatoire et il sera à même de contribuer au travail minutieux de la mesure des étoiles doubles.

| 1 | 2 | 3 | 4 | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|----------|--------|---------|----------|---------|------|--------|-----------|---|
| 1 | STT 514 | | Oh02m,0 | + 41°49' | 6,9-9,5 | 169° | 5",32 | 1958 | |
| 2 | STF 3056 | | 02,1 | + 33 59 | 7,4-7,4 | 146 | 0,68 | 1975 | |
| 3 | STF 3057 | | 02,3 | + 58 15 | 7,2-9,3 | 298 | 3,62 | 1973 | |
| 4 | STF 3062 | | 03,5 | + 58 09 | 6,9-8,0 | 287 | 1,42 | 1980 Orb. | |
| 5 | STF 2 | | 06,5 | + 79 26 | 6,3-6,6 | 24 | 0,66 | 1980 Orb. | |
| 6 | STT 1 | | 09,2 | + 65 51 | 7,2-9,9 | 208 | 1,38 | 1963 | |
| 7 | BU 255 | | 09,3 | + 28 09 | 7,5-7,8 | 77 | 0,56 | 1975 | |
| 8 | STF 13 | | 13,4 | + 76 40 | 6,6-7,1 | 57 | 0,86 | 1980 Orb. | |
| 9 | STF 19 | | 14,1 | + 36 20 | 7,0-9,5 | 139 | 2,26 | 1961 | |
| 10 | STF 24 | | 15,9 | + 25 52 | 7,2-8,0 | 249 | 5,20 | 1967 | |
| 11 | AC 1 | | 18,3 | + 32 42 | 7,5-8,0 | 290 | 1,76 | 1970 | N |
| 12 | BU 1093 | | 18,3 | + 10 42 | 7,1-8,0 | 108 | 0,60 | 1973 | N |
| 13 | STT 6 | | 18,6 | + 66 44 | 7,2-8,2 | 151 | 0,62 | 1980 Orb. | |
| 14 | Ho 210 | | 23,0 | + 36 12 | 8,0-9,7 | 75 | 0,95 | 1967 | |
| *15 | STT 12 | λ Cas | 29,0 | + 54 15 | 5,6-5,9 | 183 | 0,58 | 1980 Orb. | |
| 16 | A 911 | | 30,7 | + 47 22 | 7,9-8,6 | 318 | 0,55 | 1963 | |
| 17 | Se 1 | | 31,9 | - 4 49 | 7,5-8,0 | 258 | 0,54 | 1965 | |
| 18 | STF 42 | | 33,4 | + 29 44 | 7,9-8,7 | 24 | 6,01 | 1974 | |
| *19 | STF 46 | 55 Pis | 37,3 | + 21 10 | 5,5-8,2 | 193 | 6,64 | | N |
| 20 | STF 48 | | 39,5 | + 71 06 | 7,0-7,2 | 334 | 5,42 | 1962 | |
| 21 | STT 18 | | Oh39m,8 | +3°54' | 7,4-9,5 | 199° | 1",47 | 1980 Orb. | |
| 22 | STF 52 | | 41,4 | + 45 58 | 8,0-9,0 | 12 | 1,42 | 1974 | |
| 23 | STF 55 | | 41,7 | + 33 21 | 8,0-8,8 | 328 | 2,20 | 1963 | |
| 24 | STF 59 | | 45,2 | + 51 10 | 7,2-8,1 | 144 | 2,13 | 1965 | |
| *25 | STF 60 | η Cas | 46,1 | + 57 33 | 4,04,6 | 307 | 11,98 | 1980 Orb. | N |
| *26 | STF 61 | 65 Pis | 47,2 | + 27 26 | 6,0-6,0 | 116 | 4,34 | 1967 | |
| 27 | STF 65 | | 49,6 | + 68 36 | 8,0-8,0 | 38 | 3,14 | 1968 | |
| 28 | STT 20 | 66 Pis | 51,9 | + 18 55 | 5,9-7,0 | 224 | 0,48 | 1980 Orb. | |
| 29 | Hu 802 | | 52,0 | + 49 08 | 7,2-7,8 | 213 | 0,37 | 1966 | |
| *30 | STF 73 | 36 And | 52,3 | + 23 22 | 6,2-6,8 | 262 | 0,65 | 1980 Orb. | |
| 31 | BU 302 | | 55,6 | + 21 08 | 6,7-8,1 | 153 | 0,43 | 1974 | N |
| 32 | STF 79 | | 57,2 | + 44 27 | 6,0-7,0 | 193 | 7,87 | 1958 | |
| 33 | Ma 1 | | 57,7 | + 47 03 | 7,9-8,4 | 13 | 0,95 | 1974 | |
| 34 | A 2901 | | 58,2 | + 69 05 | 7,6-7,6 | 45 | 0,39 | 1962 | N |
| 35 | BU 1161 | | 1h00m,0 | + 51 32 | 6,9-7,7 | 355 | 0,38 | 1961 | |
| 36 | STT 21 | | 00,1 | + 47 07 | 6,9-8,2 | 175 | 0,89 | 1980 Orb. | |
| 37 | BU 396 | | 00,5 | + 60 48 | 6,1-8,5 | 69 | 1,33 | 1965 | |
| 38 | Hu 517 | | 00,8 | + 50 10 | 7,8-8,2 | 23 | 0,48 | 1971 | |
| 39 | Ho 213 | | 01,2 | + 35 12 | 7,0-7,0 | 91 | 0,29 | 1974 | N |
| *40 | STF 88 | ψ1 Pis | 03,0 | + 21 13 | 4,9-5,0 | 160 | 29,97 | | |
| 41 | STF 90 | 77 Pis | 03,2 | +4°39' | 5,9-6,4 | 83° | 32",91 | | |
| 42 | STF 91 | | 04,6 | -2 00 | 6,7-7,5 | 316 | 4,23 | 1970 | |
| 43 | STT 515 | φ And | 06,6 | + 46 59 | 4,9-6,5 | 140 | 0,47 | 1980 Orb. | |
| 44 | BU 303 | | 07,0 | + 23 32 | 7,1-7,3 | 290 | 0,66 | 1967 | |
| 45 | BU 235 | | 07,6 | + 50 45 | 7,0-7,4 | 124 | 1,04 | 1975 | N |
| 46 | STF 96 | | 09,4 | + 64 45 | 7,8-8,8 | 286 | 0,96 | 1973 | |
| 47 | BU 258 | | 10,0 | + 61 27 | 6,2-9,0 | 262 | 1,24 | 1973 | |
| *48 | BU 1029 | ζ Pis | 11 | +7 19 | 4,2-5,3 | 63 | 23,20 | | N |
| 49 | BU 1100 | | 11,6 | + 60 41 | 7,4-7,4 | 37 | 0,53 | 1980 Orb. | |
| 50 | STT 28 | | 14,3 | + 80 36 | 7,0-8,5 | 295 | 0,78 | 1964 | |
| 51 | STF 113 | 42 Cet | 17,2 | 0 46 | 6,2-7,2 | 11 | 1,59 | 1974 | N |
| 52 | BU 4 | | 18,7 | + 11 17 | 7,0-7,5 | 113 | 0,41 | 1980 Orb. | |
| 53 | STF 115 | | 20,1 | + 57 53 | 7,3-7,5 | 137 | 0,51 | 1974 | |
| 54 | BU 1164 | 95 Pis | 25,1 | +5 06 | 6,7-7,0 | 156 | 0,44 | 1980 Orb. | |
| 55 | STF 138 | | 33,4 | +7 23 | 7,3-7,3 | 53 | 1,71 | 1975 | |
| 56 | BU 5 | | 36,6 | + 16 22 | 7,0-9,0 | 288 | 0,78 | 1967 | N |
| 57 | STF 141 | | 37,1 | + 38 43 | 8,0-8,5 | 304 | 1,60 | 1966 | |
| 58 | Kr 12 | | 38,1 | + 62 28 | 7,7-7,7 | 119 | 0,41 | 1964 | |
| *59 | STF 147 | x1 Cet | 39,3 | - 11 34 | 6,0-7,3 | 89 | 2,03 | 1962 | N |
| 60 | BU 870 | | 41,0 | + 57 17 | 6,9-8,3 | 20 | 1,00 | 1965 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|---------|----------|---------|----------|---------|------|--------|-------------|
| 61 | STF 155 | | 1h41m,6 | +9°14' | 7,5-7,9 | 328° | 4",83 | 1962 |
| 62 | BU 6 | | 42,2 | -7 01 | 6,4-9,2 | 165 | 2,25 | 1974 |
| 63 | STT 34 | | 44,3 | + 80 38 | 7,3-7,5 | 280 | 0,44 | 1980 Orb. |
| 64 | STF 162 | | 46,2 | + 47 39 | 7,0-7,5 | 206 | 2,01 | 1975 |
| 65 | STF 174 | l Ari | 47,4 | + 22 02 | 6,2-7,4 | 166 | 2,90 | 1965 |
| 66 | Ho 311 | | 48,4 | + 24 25 | 7,0-7,2 | 209 | 0,30 | 1973 |
| *67 | STF 93 | α UMi | 48,8 | + 89 02 | 2,0-9,0 | 217 | 18,28 | N |
| 68 | STF 178 | | 49,4 | + 10 34 | 7,8-7,8 | 200 | 3,10 | 1952 |
| 69 | STF 179 | | 50,2 | + 37 05 | 6,7-7,7 | 158 | 3,30 | 1966 |
| 70 | STF 170 | | 50,6 | + 75 59 | 6,7-7,5 | 248 | 3,30 | |
| *71 | STF 180 | γ Ari | 50,8 | + 19 03 | 4,2-4,4 | 0 | 7,82 | N |
| 72 | STF 182 | | 52,9 | + 61 02 | 7,0-7,0 | 123 | 3,59 | 1953 |
| 73 | STF 186 | | 53,3 | +1 36 | 7,2-7,2 | 53 | 1,22 | 1980 Orb. |
| 74 | STF 194 | | 56,5 | + 24 35 | 8,0-8,3 | 276 | 1,09 | 1965 |
| 75 | BU 513 | 48 Cas | 57,8 | + 70 40 | 5,0-7,5 | 200 | 0,70 | 1980 Orb. |
| *76 | STF 202 | α Pis | 59,4 | +2 31 | 4,0-5,0 | 288 | 1,95 | 1974 |
| *77 | STF 205 | γ And | 2h00m,8 | + 42 06 | 3,0-5,0 | 63 | 10,01 | N |
| 78 | STT 38 | γ And BC | id | id | 5,0-6,2 | 108 | 0,55 | 1980 Orb. N |
| 79 | BU 516 | | 02,7 | -1 12 | 8,0-8,0 | 305 | 0,62 | 1963 |
| 80 | STF 212 | | 03,4 | + 24 25 | 8,0-8,5 | 163 | 1,92 | 1971 |
| 81 | STF 222 | 59 And | 07,8 | + 38°48' | 6,7-7,2 | 35° | 16",64 | 1923 |
| 82 | STF 224 | | 08,2 | + 13 27 | 7,5-8,0 | 243 | 5,98 | 1959 |
| 83 | STF 226 | | 09,4 | + 23 44 | 7,8-9,7 | 238 | 1,82 | 1972 |
| *84 | STF 227 | ι Tri | 09,5 | + 30 04 | 5,0-6,4 | 71 | 3,84 | 1970 |
| 85 | STF 231 | 66 Cet | 10,2 | - 2 38 | 6,0-7,8 | 235 | 16,17 | 1958 |
| 86 | STF 228 | | 10,8 | + 47 15 | 6,7-7,6 | 266 | 1,05 | 1980 Orb. |
| 87 | STF 232 | | 11,8 | + 30 10 | 7,5-7,5 | 245 | 6,44 | 1965 |
| 88 | STF 249 | | 18,4 | + 44 22 | 7,0-9,0 | 195 | 2,19 | 1969 |
| *89 | STF 262 | ι Cas | 24,9 | + 67 11 | 4,2-7,1 | 236 | 2,34 | 1980 Orb. N |
| 90 | KUI 8 | | 25,4 | + 1 44 | 6,1-6,5 | 32 | 0,50 | 1970 N |
| 91 | STF 268 | | 25,9 | + 55 19 | 6,9-8,2 | 131 | 2,70 | 1963 |
| 92 | STF 274 | | 28,9 | + 0 52 | 7,2-7,7 | 220 | 13,82 | 1958 |
| 93 | STF 280 | | 31,6 | - 5 51 | 7,5-7,7 | 346 | 3,58 | 1961 |
| 94 | STF 281 | v Cet | 33,2 | + 5 23 | 5,0-9,6 | 83 | 7,78 | |
| 95 | STF 5 | 30 Ari | 34,1 | + 24 26 | 6,1-7,1 | 274 | 38,18 | 1953 |
| 96 | STF 285 | | 35,9 | + 33 12 | 7,0-7,7 | 167 | 1,74 | 1963 |
| 97 | STF 283 | | 36,7 | + 61 16 | 8,0-8,8 | 208 | 1,73 | 1969 |
| 98 | STF 289 | 33 Ari | 37,8 | + 26 51 | 5,8-8,7 | 0 | 28,80 | |
| 99 | STT 43 | | 37,8 | + 26 25 | 7,2-8,8 | 8 | 1,03 | 1980 Orb. |
| 100 | STF 291 | | 38,3 | + 18 35 | 7,4-7,7 | 116 | 3,40 | 1968 |
| 101 | STT 45 | | 38,3 | + 4°39' | 7,0-9,2 | 275° | 1",05 | 1973 |
| 102 | STF 295 | 84 Cet | 38,6 | - 0 54 | 6,0-9,2 | 312 | 4,09 | 1968 |
| 103 | STT 44 | | 39,0 | + 42 29 | 7,8-8,5 | 58 | 1,40 | 1969 |
| *104 | STF 299 | γ Cet | 40,7 | + 3 02 | 3,0-6,8 | 297 | 2,79 | 1966 |
| 105 | STF 300 | | 41,6 | + 29 15 | 7,9-8,1 | 311 | 3,13 | 1963 |
| 106 | BU 9 | | 44,0 | + 35 21 | 6,3-8,4 | 191 | 1,52 | 1975 |
| 107 | STF 305 | | 44,6 | + 19 10 | 7,3-8,2 | 309 | 3,64 | 1980 Orb. |
| *108 | STF 311 | π Ari | 46,5 | + 17 15 | 4,9-8,4 | 118 | 3,17 | 1969 N |
| 109 | STF 315 | | 46,9 | - 10 45 | 7,5-8,7 | 162 | 1,83 | 1964 |
| *110 | STF 307 | η Per | 47,0 | + 55 41 | 4,0-8,5 | 301 | 28,42 | |
| 111 | STF 306 | | 47,2 | + 60 13 | 7,1-9,0 | 95 | 2,09 | 1965 |
| 112 | STF 314 | | 49,3 | + 52 48 | 6,9-7,1 | 307 | 1,45 | N |
| 113 | STF 312 | | 51,0 | + 72 41 | 7,1-8,0 | 35 | 2,33 | 1974 N |
| 114 | BU 525 | | 56,0 | + 21 25 | 7,2-7,2 | 267 | 0,42 | 1980 Orb. |
| *115 | STF 333 | ε Ari | 56,4 | + 21 08 | 5,7-6,0 | 207 | 1,36 | 1972 N |
| 116 | STF 334 | | 56,7 | + 6 27 | 7,7-8,2 | 312 | 1,18 | 1972 |
| *117 | STF 331 | | 57,2 | + 52 09 | 5,3-6,7 | 86 | 12,18 | |
| 118 | BU 11 | p2 Eri | 3h00m,2 | - 7 53 | 5,4-9,6 | 71 | 1,79 | N |
| 119 | STF 349 | | 06,6 | + 63 36 | 7,4-8,1 | 321 | 6,10 | 1962 |
| 120 | STT 50 | | 07,6 | + 71 02 | 7,5-7,5 | 170 | 1,15 | 1975 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|------|---------|--------|---------|----------|---------|------|-------|-----------|---|
| 121 | STF 360 | | 3h09m,0 | + 37°02' | 7,8-8,0 | 127° | 2",72 | 1974 | N |
| 122 | STT 51 | | 09,6 | + 44 06 | 7,9-8,1 | 324 | 1,20 | 1975 | |
| *123 | h 3555 | α For | 09,9 | - 29 12 | 4,0-7,0 | 305 | 3,00 | 1980 Orb. | |
| 124 | STF 367 | | 11,5 | + 0 33 | 8,0-8,0 | 143 | 1,00 | 1980 Orb. | |
| 125 | STT 52 | | 13,1 | + 65 29 | 6,4-7,0 | 69 | 0,45 | 1980 Orb. | |
| 126 | BU 84 | | 13,6 | - 6 06 | 7,2-7,4 | 15 | 0,85 | 1971 | |
| 127 | STF 369 | | 13,9 | + 40 18 | 6,5-7,8 | 30 | 3,56 | 1958 | |
| 128 | STT 53 | | 14,5 | + 38 27 | 7,2-8,0 | 265 | 0,86 | 1980 Orb. | |
| 129 | COU 259 | τ Ari | 18,3 | + 20 58 | 5,0-8,4 | 246 | 0,66 | 1970 | N |
| 130 | Hu 1058 | | 21,7 | + 40 03 | 7,8-8,5 | 116 | 0,80 | 1967 | |
| 131 | STF 384 | | 24,4 | + 59 44 | 7,8-9,0 | 269 | 2,02 | 1966 | |
| 132 | STF 394 | | 25,0 | + 20 17 | 7,0-8,0 | 163 | 6,80 | 1968 | N |
| 133 | STF 391 | | 25,8 | + 44 53 | 7,3-8,0 | 95 | 3,69 | 1923 | |
| 134 | STF 389 | | 26,1 | + 59 12 | 7,0-8,0 | 70 | 2,62 | 1964 | |
| 135 | STF 401 | | 28,3 | + 27 24 | 6,5-7,0 | 270 | 1,40 | 1967 | |
| 136 | STF 400 | | 30,9 | + 59 52 | 7,0-8,0 | 258 | 1,25 | 1980 Orb. | |
| 137 | STF 412 | 7 Tau | 31,5 | + 24 18 | 6,6-6,7 | 6 | 0,65 | 1980 Orb. | |
| 138 | BU 533 | | 32,5 | + 31 31 | 7,0-7,0 | 224 | 1,05 | 1973 | |
| 139 | STF 422 | | 34,2 | + 0 26 | 6,0-8,2 | 264 | 6,60 | 1967 | |
| 140 | STF 425 | | 37,0 | + 33 57 | 7,3-7,3 | 78 | 1,84 | 1968 | N |
| 141 | STT 59 | | 37,2 | + 45°52' | 7,5-7,8 | 354° | 2",57 | 1973 | |
| 142 | STF 419 | | 37,6 | + 69 41 | 7,2-7,2 | 73 | 2,78 | 1967 | N |
| 143 | STF 427 | | 37,6 | + 28 37 | 6,6-7,4 | 209 | 6,86 | | |
| 144 | STF 431 | 40 Per | 39,2 | + 33 48 | 5,0-9,5 | 238 | 20,0 | | |
| 145 | BU 535 | o Per | 41,2 | + 32 08 | 4,0-8,5 | 30 | 1,03 | 1963 | |
| 146 | Ho 504 | | 41,4 | + 35 42 | 7,8-8,0 | 195 | 1,14 | 1968 | |
| 147 | STT 516 | | 46,0 | + 32 07 | 7,2-9,2 | 43 | 2,27 | 1967 | |
| *148 | STT 65 | | 47,3 | + 25 26 | 6,5-6,8 | 206 | 0,71 | 1980 Orb. | |
| 149 | STT 66 | | 48,7 | + 40 39 | 7,5-8,0 | 144 | 0,89 | 1964 | |
| *150 | KUI 15 | 31 Tau | 49,3 | + 6 23 | 5,5-5,6 | 211 | 0,55 | 1967 | N |
| *151 | STF 464 | ζ Per | 51,0 | + 31 44 | 2,7-9,3 | 208 | 12,9 | | |
| *152 | STF 470 | W Eri | 51,8 | - 3 06 | 4,0-6,0 | 345 | 6,90 | 1963 | |
| 153 | Hn 67 | | 52,2 | - 12 52 | 7,8-8,5 | 155 | 2,75 | 1951 | |
| 154 | STT 67 | | 52,9 | + 60 58 | 5,0-8,2 | 46 | 1,78 | 1963 | |
| 155 | STF 471 | ε Pen | 54,5 | + 39 52 | 3,1-8,3 | 9 | 8,99 | | |
| 156 | STT 69 | | 56,3 | + 38 41 | 6,4-9,1 | 326 | 1,87 | | |
| 157 | STF 479 | | 58,0 | + 23 04 | 7,0-7,9 | 127 | 7,47 | 1957 | |
| *158 | STF 460 | 49 Cep | 4h01m,4 | + 80 34 | 5,2-6,1 | 112 | 0,77 | 1980 Orb. | |
| 159 | STF 485 | | 03,4 | + 62 12 | 6,1-6,2 | 305 | 17,92 | 1954 | N |
| 160 | STT 531 | | 04,2 | + 37 57 | 6,5-8,2 | 3 | 1,45 | 1980 Orb. | |
| 161 | STF 495 | | 04,8 | + 15°02' | 6,0-8,8 | 222° | 3",80 | 1972 | |
| 162 | STT 72 | | 05,1 | + 17 12 | 6,1-9,2 | 326 | 4,44 | | |
| 163 | STF 494 | | 05,9 | + 22 58 | 7,7-7,7 | 187 | 5,25 | | |
| 164 | BU 546 | | 08,0 | + 41 44 | 8,0-8,0 | 39 | 0,98 | 1966 | |
| 165 | BU 547 | 47 Tau | 11,2 | + 9 08 | 5,5-8,0 | 347 | 1,25 | 1970 | |
| 166 | STT 77 | | 12,8 | + 31 34 | 7,5-7,5 | 271 | 0,78 | 1980 Orb. | |
| 167 | STF 511 | | 13,7 | + 58 40 | 7,5-8,0 | 107 | 0,40 | 1980 Orb. | |
| 168 | STT 75 | | 14,3 | + 60 22 | 7,6-8,0 | 174 | 0,46 | 1969 | |
| 169 | BU 87 | | 19,4 | + 20 42 | 5,7-8,8 | 169 | 2,02 | 1970 | |
| 170 | STF 528 | x Tau | 19,5 | + 25 31 | 5,7-7,8 | 24 | 19,42 | 1955 | |
| 171 | STT 82 | | 19,9 | + 14 56 | 7,0-9,0 | 359 | 1,40 | 1980 Orb. | |
| 172 | STT 80 | | 20,1 | + 42 19 | 6,5-7,0 | 166 | 0,44 | 1969 | |
| 173 | STF 535 | | 20,5 | + 11 16 | 6,7-8,2 | 302 | 1,36 | 1970 | |
| 174 | Hu 304 | 66 Tau | 21,1 | + 9 21 | 5,9-5,9 | 71 | 0,21 | 1980 Orb. | |
| 175 | Ho 15 | | 21,3 | + 30 01 | 8,0-8,0 | 145 | 0,72 | 1968 | |
| *176 | KUI 17 | δ Tau | 22,6 | + 17 48 | 4,2-7,9 | 334 | 1,54 | 1968 | N |
| 177 | STF 531 | | 22,7 | + 55 32 | 7,4-8,6 | 317 | 1,10 | 1966 | |
| 178 | BU 311 | | 24,8 | - 24 11 | 6,5-7,0 | 116 | 0,53 | 1980 Orb. | |
| 179 | BU 184 | | 25,8 | - 21 37 | 6,2-7,0 | 256 | 1,48 | | |
| 180 | STF 554 | 80 Tau | 27,3 | + 15 32 | 6,5-9,0 | 16 | 1,81 | 1980 Orb. | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|----------|---------|---------|----------|---------|------------------|-------|-------------|
| 181 | STF 552 | | 4h28m,0 | + 39°54' | 6,3-6,5 | 115° | 9",1 | |
| *182 | STF 550 | l Cam | 28 ,1 | + 53 48 | 5,1-6,2 | 308 | 10 ,2 | |
| 183 | STF 559 | | 30 ,6 | + 17 55 | 7,0-7,1 | 276 | 2 ,90 | 1964 |
| 184 | STT 86 | | 33 ,6 | + 19 40 | 7,5-7,5 | 25 | 0 ,46 | 1972 |
| 185 | STF 565 | | 34 ,6 | + 42 01 | 7,2-8,5 | 170 | 1 ,37 | 1972 |
| *186 | STF 572 | | 35 ,4 | + 26 51 | 6,5-6,5 | 194 | 4 ,03 | 1968 |
| 187 | KUI 18 | l Eri | 35 ,9 | - 14 24 | 4,0-7,0 | 52 | 0 ,73 | 1961 N |
| 188 | STF 566 | 2 Cam | 36 ,0 | + 53 23 | 5,4-7,4 | 229 | 0 ,81 | 1980 Orb. N |
| 189 | STF 577 | | 38 ,8 | + 37 25 | 7,7-7,7 | 25 | 1 ,01 | 1975 N |
| 190 | STF 590 | 55 Eri | 41 ,2 | - 8 53 | 6,6-6,8 | 318 | 9 ,28 | 1953 |
| 191 | STT 90 | | 52 ,2 | + 8 31 | 7,0-9,0 | 340 | 1 ,94 | 1969 |
| 192 | STT 88 | | 52 ,7 | + 61 41 | 6,5-8,2 | 310 | 0 ,79 | 1974 |
| 193 | STT 91 | | 53 ,6 | + 3 06 | 7,0-7,5 | 231 | 0 ,53 | 1968 |
| 194 | STT 92 | 5 Aur | 56 ,9 | + 39 19 | 6,0-9,7 | 272 | 3 ,70 | 1963 N |
| 195 | STF 631 | | 58 ,4 | - 13 34 | 7,2-8,7 | 106 | 5 ,68 | |
| 196 | STF 636 | | 5h00m,6 | - 8 44 | 7,5-8,6 | 104 | 3 ,70 | 1971 |
| 197 | STT 95 | | 02 ,6 | + 19 44 | 6,6-7,2 | 307 | 0 ,90 | 1968 |
| 198 | STT 98 | 14 Ori | 05 ,2 | + 8 26 | 6,0-6,8 | 21 | 0 ,68 | 1980 Orb. |
| 199 | STF 645 | | 06 ,6 | + 27 58 | 6,2-8,7 | 27 | 11,60 | 1961 N |
| 200 | STF 644 | | 06 ,9 | + 37 14 | 6,7-7,0 | 221 | 1 ,63 | 1960 |
| 201 | STF 648 | | 07 ,8 | + 31°59' | 7,4-8,1 | 66° | 4",77 | 1957 |
| 202 | STF 652 | | 09 ,2 | + 0 59 | 6,3-7,8 | 182 | 1 ,67 | 1957 |
| *203 | STF 654 | p Ori | 10 ,7 | + 2 48 | 4,7-8,5 | 64 | 6 ,92 | 1961 |
| 204 | STT 517 | | 10 ,9 | + 1 55 | 6,5-6,7 | 228 | 0 ,54 | 1980 Orb. N |
| *205 | STF 661 | x Lep | 10 ,9 | - 13 00 | 5,0-7,9 | 359 | 2 ,64 | 1938 |
| *206 | STF 668 | β Ori | 12 ,1 | - 8 15 | 1,0-8,0 | 203 | 9 ,50 | 1962 N |
| 207 | STF 664 | | 12 ,4 | + 8 23 | 7,5-8,0 | 171 | 4 ,98 | |
| 208 | STF 634 | 19 Cam | 14 ,3 | + 79 12 | 4,5-9,0 | 114 | 15 ,9 | 1961 |
| 209 | STF 657 | | 14 ,8 | + 52 47 | 7,5-8,0 | 301 | 1 ,00 | 1974 N |
| 210 | h 3750 | 38 Lep | 18 ,3 | - 21 17 | 4,8-9,5 | 281 | 4 ,36 | |
| 211 | h 3752 | 41 Lep | 19 ,8 | - 24 49 | 5,5-6,7 | 99 | 3 ,14 | |
| 212 | STF 677 | | 20 ,0 | + 63 21 | 7,7-8,0 | 158 | 1 ,04 | 1980 Orb. |
| 213 | Wnc 2 | | 21 ,3 | - 0 55 | 6,5-7,5 | 161 | 2 ,41 | 1952 N |
| *214 | Da 5 | η Ori | 22 ,0 | - 2 26 | 4,0-5,0 | 81 | 1 ,50 | 1971 |
| 215 | Ho 226 | | 23 ,9 | + 27 34 | 7,0-7,0 | 257 | 0 ,81 | 1969 |
| *216 | STF 716 | 118 Tau | 26 ,2 | + 25 07 | 5,8-6,6 | 206 | 4 ,83 | 1957 |
| 217 | Da 6 | | 26 ,5 | - 3 20 | 7,2-7,5 | 143 | 0 ,27 | 1966 N |
| *218 | STF 728 | 32 Ori | 28 ,1 | + 5 55 | 5,2-6,7 | 44 | 0 ,93 | 1980 Orb. |
| *219 | STF 729 | 33 Ori | 28 ,6 | + 3 15 | 6,0-7,3 | 26 | 1 ,88 | 1957 |
| 220 | BU 1049 | | 30 ,6 | - 1 45 | 7,0-8,6 | 355 | 1 ,46 | 1967 N |
| 221 | Mlr 314 | | 32 ,1 | + 66°40' | 6,5-7,3 | 306° | 0",27 | 1972 N |
| *222 | STF 738 | λ Ori | 32 ,4 | + 9 54 | 4,0-6,0 | 44 | 4 ,28 | 1955 |
| *223 | STF 748 | θ Ori | 32 ,8 | - 5 25 | 4,7 | Système multiple | | N |
| 224 | Da 4 | 42 Ori | 32 ,9 | - 4 52 | 5,5-8,7 | 207 | 1 ,49 | 1968 |
| 225 | STF 750 | | 33 ,0 | - 4 24 | 6,0-8,0 | 58 | 4 ,36 | 1940 |
| *226 | STF 752 | t Ori | 33 ,0 | - 5 56 | 3,2-7,3 | 141 | 11 ,4 | |
| 227 | STF 742 | | 33 ,4 | + 21 58 | 7,2-7,8 | 269 | 4 ,00 | 1968 |
| 228 | STF 749 | | 34 ,0 | + 26 54 | 7,1-7,2 | 330 | 1 ,12 | 1966 N |
| 229 | STF 753 | 26 Aur | 35 ,4 | + 30 28 | 5,0-8,0 | 267 | 12 ,3 | 1960 N |
| 230 | STT 112 | | 36 ,5 | + 37 56 | 7,3-8,0 | 55 | 0 ,72 | 1974 |
| *231 | STF 774 | ζ Ori | 38 ,2 | - 1 58 | 2,0-5,7 | 160 | 2 ,36 | |
| 232 | STF 785 | | 42 ,8 | + 25 54 | 6,7-7,7 | 348 | 14 ,2 | |
| 233 | BU 560 | | 44 ,2 | + 29 39 | 8,0-8,0 | 136 | 1 ,40 | 1971 |
| 234 | STF 3115 | | 44 ,4 | + 62 48 | 6,7-7,8 | 358 | 0 ,90 | 1969 |
| *235 | STF 795 | 52 Ori | 45 ,3 | + 6 26 | 6,2-6,2 | 211 | 1 ,35 | |
| 236 | STF 780 | | 46 ,0 | + 65 44 | 6,7-7,9 | 104 | 3 ,81 | |
| 237 | STF 813 | | 51 ,4 | + 18 53 | 8,0-8,0 | 148 | 3 ,08 | |
| *238 | STT 545 | θ Aur | 56 ,3 | + 37 13 | 3,0-7,5 | 317 | 3 ,48 | 1967 N |
| 239 | STF 848 | | 6h05m,7 | + 13 59 | 7,3-8,0 | 110 | 2 ,41 | 1964 |
| 240 | STF 855 | | 06 ,4 | + 2 31 | 5,8-6,8 | 113 | 29 ,4 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|----------|-----------|---------|----------|---------|------|-------|-------------|
| *241 | STF 845 | 41 Aur | 6h07m,8 | + 48°44' | 5,2-6,4 | 356° | 7",66 | |
| 242 | STF 867 | | 08,7 | + 17 23 | 7,0-8,5 | 158 | 2,22 | |
| 243 | KUI 24 | | 11,6 | + 17 55 | 6,5-6,5 | 320 | 0,56 | 1967 N |
| *244 | BU 1008 | η Gem | 11,9 | + 22 31 | 3,0-6 | 265 | 1,40 | 1968 N |
| 245 | STF 872 | | 12,3 | + 36 10 | 6,0-7,0 | 217 | 11,2 | |
| 246 | STF 880 | | 12,7 | + 10 36 | 8,0-8,0 | 54 | 5,48 | |
| 247 | STF 881 | 4 Lyn | 17,6 | + 59 24 | 6,4-7,9 | 129 | 0,78 | N |
| 248 | A 2667 | | 18,8 | + 2 18 | 7,5-7,8 | 153 | 0,40 | 1980 Orb. |
| 249 | STF 899 | | 19,9 | + 17 36 | 7,0-8,0 | 19 | 2,26 | |
| 250 | STF 900 | 8 Mon | 21,1 | + 4 37 | 4,0-6,7 | 30 | 13,3 | |
| *251 | STF 919 | β Mon | 26,4 | - 7 00 | 5,0-5,5 | 132 | 7,25 | N |
| 252 | STF 924 | 20 Gem | 29,4 | + 17 49 | 6,0-6,9 | 210 | 20,0 | |
| 253 | STF 918 | | 30,0 | + 52 30 | 6,7-7,7 | 330 | 4,52 | |
| 254 | STF 928 | | 31,2 | + 38 35 | 7,4-8,0 | 133 | 3,41 | 1955 |
| 255 | STF 941 | | 35,2 | + 41 38 | 7,0-8,0 | 82 | 1,77 | 1966 |
| 256 | STF 936 | | 35,4 | + 58 09 | 7,0-8,7 | 277 | 1,30 | 1967 |
| 257 | STT 152 | 54 Aur | 36,4 | + 28 19 | 6,0-7,8 | 34 | 0,96 | 1966 |
| 258 | STF 945 | | 36,8 | + 41 01 | 7,1-8,0 | 307 | 0,47 | 1974 N |
| 259 | Mr 318 | | 37,4 | + 66 15 | 7,1-8,7 | 309 | 1,27 | 1972 N |
| 260 | STF 950 | 15 Mon | 38,2 | + 9 57 | 6,0-8,8 | 212 | 2,92 | 1963 |
| 261 | STF 946 | | 40,4 | + 59°30' | 7,2-9,0 | 130° | 4",15 | |
| 262 | STT 154 | | 40,8 | + 40 41 | 6,7-8,4 | 103 | 23,18 | 1963 N |
| *263 | STF 948 | 12 Lyn | 41,8 | + 59 30 | 5,2-6,1 | 259 | 1,69 | 1980 Orb. N |
| *264 | Sirius | | 43,0 | - 16 39 | - 1,6-8 | 49 | 10,25 | 1980 Orb. N |
| *265 | STF 958 | | 44,0 | + 55 46 | 6,0-6,0 | 78 | 4,78 | 1962 |
| 266 | STT 156 | | 44,5 | + 18 15 | 6,5-7,0 | 243 | 0,54 | 1980 Orb. |
| 267 | STT 157 | | 45,2 | + 0 24 | 7,5-8,0 | 218 | 0,34 | 1980 Orb. |
| 268 | STF 963 | 14 Lyn | 48,7 | + 59 31 | 5,9-7,1 | 251 | 0,43 | 1980 Orb. |
| *269 | STF 982 | 38 Gem | 51,8 | + 13 15 | 5,4-7,7 | 151 | 6,98 | 1962 N |
| 270 | STF 981 | | 52,2 | + 30 14 | 8,0-8,0 | 136 | 1,68 | 1973 N |
| *271 | STT 159 | 15 Lyn | 53,0 | + 58 29 | 5,1-6,2 | 33 | 0,97 | 1958 |
| *272 | STF 997 | μ C. Ma | 53,8 | - 13 59 | 4,7-8,0 | 339 | 3,00 | |
| 273 | CO 7 | ε C. Ma | 56,7 | - 28 54 | 1,6-8,0 | 160 | 7,45 | |
| 274 | STF 973 | | 57,5 | + 75 19 | 6,6-7,6 | 30 | 12,49 | 1961 |
| 275 | STF 1009 | | 7h01m,7 | + 52 50 | 6,7-6,8 | 149 | 3,93 | 1957 N |
| 276 | STF 1025 | | 08,8 | + 55 53 | 7,5-7,8 | 135 | 24,6 | |
| 277 | STF 1037 | | 09,7 | + 27 19 | 7,1-7,1 | 324 | 1,13 | 1973 N |
| 278 | STF 1033 | | 10,8 | + 52 38 | 7,4-8,0 | 278 | 1,49 | |
| 279 | STF 1056 | | 13,0 | - 1 46 | 7,8-8,8 | 299 | 3,85 | |
| 280 | h 3945 | 145 C. Ma | 14,5 | - 23 13 | 5,0-7,0 | 58 | 27,4 | |
| 281 | STT 170 | | 14,9 | + 9°23' | 7,5-7,8 | 92° | 1",38 | 1966 |
| *282 | STF 1066 | δ Gem | 17,1 | + 22 05 | 3,2-8,2 | 217 | 6,33 | 1961 N |
| 283 | STF 1074 | | 18,0 | + 0 30 | 7,8-8,2 | 163 | 0,62 | 1965 N |
| 284 | STF 1065 | 20 Lyn | 18,4 | + 50 15 | 6,6-6,8 | 254 | 15,1 | |
| 285 | STF 1062 | 19 Lyn | 18,8 | + 55 23 | 5,3-6,6 | 315 | 14,7 | |
| 286 | STF 1081 | | 21,2 | + 21 33 | 7,8-8,5 | 230 | 1,80 | 1972 |
| 287 | STF 1083 | | 22,6 | + 20 36 | 6,7-7,8 | 45 | 6,71 | 1956 |
| 288 | STF 1094 | | 24,6 | + 15 25 | 7,7-8,7 | 96 | 2,44 | 1971 |
| 289 | STF 1104 | | 27,1 | - 14 53 | 6,7-8,3 | 3 | 2,14 | 1965 N |
| 290 | STF 1103 | | 27,9 | + 5 22 | 7,0-8,5 | 245 | 4,16 | 1965 |
| *291 | STF 1110 | Castor | 31,4 | + 32 00 | 2,7-3,7 | 98 | 2,31 | 1980 Orb. N |
| 292 | STF 1116 | | 31,8 | + 12 25 | 7,0-7,7 | 100 | 1,78 | 1969 |
| 293 | STT 174 | | 32,4 | + 43 09 | 6,5-8,1 | 86 | 2,08 | 1967 |
| 294 | STF 1121 | | 34,3 | - 14 22 | 7,2-7,5 | 304 | 7,44 | |
| 295 | STF 1126 | | 37,5 | + 5 21 | 7,2-7,5 | 160 | 1,01 | 1966 N |
| *296 | STT 179 | x Gem | 41,4 | + 24 31 | 4,0-8,5 | 241 | 6,47 | 1960 |
| 297 | STF 1127 | | 42,4 | + 64 11 | 6,2-8,0 | 340 | 5,40 | |
| 298 | STF 1138 | 2 Pup | 43,2 | - 14 34 | 6,2-7,0 | 339 | 16,90 | |
| 299 | STF 1140 | | 45,5 | + 18 28 | 6,8-8,5 | 274 | 6,22 | |
| 300 | Wil 15 | 82 Gem | 45,6 | + 23 16 | 6,0-6,0 | 49 | 0,24 | 1975 N |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|------|----------|---------|---------|----------|---------|------|-------|-----------|---|
| 301 | STF 1146 | 5 Pup | 7h45m,6 | - 12°04' | 5,3-7,4 | 358° | 1",88 | 1974 | N |
| 302 | BU 1195 | | 48,9 | - 9 17 | 7,3-7,6 | 87 | 0,34 | 1950 | |
| 303 | BU 101 | 9 Arg | 49,5 | - 13 46 | 5,6-6,2 | 44 | 0,19 | 1980 Orb. | N |
| 304 | STT 182 | | 50,1 | + 3 31 | 7,0-7,5 | 20 | 1,04 | 1966 | |
| 305 | STF 1157 | | 52,0 | - 2 40 | 8,0-8,0 | 212 | 0,90 | 1974 | N |
| 306 | STF 1175 | | 59,8 | + 4 18 | 7,8-9,7 | 262 | 1,26 | 1973 | N |
| 307 | STT 186 | | 8h00m,3 | + 26 25 | 7,5-8,2 | 73 | 0,94 | 1966 | |
| 308 | STT 187 | | 01,0 | + 33 10 | 6,9-7,5 | 355 | 0,31 | 1980 Orb. | |
| 309 | BU 581 | | 01,6 | + 12 26 | 8,0-8,0 | 254 | 0,48 | 1980 Orb. | |
| *310 | STF 1177 | | 02,6 | + 27 40 | 6,5-7,4 | 350 | 3,51 | 1968 | |
| 311 | STF 1187 | | 06,4 | + 32 22 | 7,1-8,0 | 30 | 2,71 | 1968 | N |
| *312 | STF 1196 | ζ Can | 09,3 | + 17 48 | 5,0-5,5 | 81 | 5,74 | 1974 | N |
| *313 | STF 1196 | | | id | 5,0-5,7 | 280 | 0,81 | 1980 Orb. | N |
| 314 | STF 1216 | | 18,8 | - 1 26 | 7,5-8,2 | 275 | 0,61 | 1980 Orb. | |
| *315 | STF 1224 | 24 Can | 23,7 | + 24 42 | 6,0-7,1 | 48 | 5,74 | 1968 | N |
| *316 | STF 1223 | φ2 Can | 23,8 | + 27 06 | 6,0-6,5 | 218 | 5,17 | 1968 | |
| 317 | I 489 | 9 Pyx | 29,3 | - 19 24 | 5,9-6,5 | 40 | 0,22 | 1972 | |
| 318 | BU 205 | | 30,9 | - 24 26 | 7,0-7,0 | 2 | 0,56 | 1980 Orb. | |
| 319 | STF 1245 | | 33,2 | + 6 48 | 6,0-7,0 | 26 | 10,22 | | |
| 320 | STF 1260 | | 38,3 | - 12 00 | 7,8-8,3 | 302 | 5,15 | 1962 | |
| 321 | Ho 529 | | 39,8 | - 17°15' | 7,6-7,6 | 184° | 0",35 | 1968 | |
| 322 | Ho 355 | | 40,4 | - 2 31 | 8,0-8,0 | 162 | 0,70 | 1967 | N |
| 323 | STF 1270 | | 42,8 | - 2 25 | 6,6-7,6 | 261 | 4,66 | | |
| 324 | STF 1268 | t Can | 43,7 | + 28 57 | 4,4-6,5 | 307 | 30,4 | 1958 | N |
| *325 | STF 1273 | e Hyd | 44,2 | + 6 36 | 3,8-7,8 | 275 | 2,84 | 1968 | N |
| 326 | STF 1275 | | 47,6 | + 57 43 | 8,0-8,0 | 196 | 1,81 | 1966 | |
| *327 | STF 1282 | | 47,6 | + 35 15 | 7,0-7,0 | 279 | 3,60 | 1968 | |
| 328 | A 2473 | | 47,8 | + 18 11 | 7,7-7,7 | 27 | 0,32 | 1971 | |
| 329 | STF 1280 | | 51,0 | + 71 00 | 7,5-7,6 | 123 | 1,20 | 1980 Orb. | |
| *330 | STF 1291 | 57 Can | 51,2 | + 30 46 | 5,9-6,4 | 317 | 1,46 | 1968 | |
| 331 | STF 1289 | | 51,4 | + 43 47 | 7,7-8,5 | 5 | 3,71 | 1967 | |
| 332 | STF 1295 | 17 Hyd | 53,0 | - 7 47 | 7,2-7,3 | 0 | 4,30 | | |
| 333 | Arg 72 | | 54,5 | - 17 14 | 7,7-7,9 | 2 | 3,46 | 1962 | |
| *334 | STT 196 | i U.Ma | 55,8 | + 48 14 | 3,1-9,0 | 21 | 4,37 | 1969 | N |
| 335 | KUI 37 | 10 U.Ma | 57,6 | + 42 00 | 4,3-6,3 | 27 | 0,69 | 1980 Orb. | N |
| 336 | STF 1298 | | 58,4 | + 32 27 | 6,1-8,2 | 136 | 4,60 | | |
| *337 | A 1585 | k U.Ma | 9h00m,2 | + 47 21 | 4,0-4,2 | 284 | 0,26 | 1980 Orb. | N |
| 338 | STF 1311 | | 04,6 | + 23 11 | 6,7-7,1 | 200 | 7,60 | 1968 | |
| 339 | STF 1306 | σ2 U.Ma | 06,0 | + 67 20 | 5,0-8,2 | 3 | 3,22 | 1980 Orb. | |
| 340 | STF 1312 | | 06,8 | + 52 35 | 7,7-8,2 | 148 | 4,46 | | |
| 341 | STF 1322 | | 09,9 | + 16°44' | 7,7-8,2 | 52° | 1",71 | 1966 | |
| 342 | STF 1318 | | 10,3 | + 47 12 | 7,5-8,7 | 234 | 2,58 | 1973 | N |
| 343 | BU 212 | | 13,6 | - 8 08 | 7,5-8,2 | 207 | 1,40 | 1963 | |
| 344 | STF 1332 | | 14,4 | + 23 52 | 7,2-7,5 | 26 | 5,81 | 1962 | |
| 345 | STF 3121 | | 14,9 | + 28 47 | 7,5-7,5 | 170 | 0,17 | 1980 Orb. | N |
| *346 | STF 1333 | | 15,4 | + 35 35 | 6,6-6,9 | 48 | 1,74 | | |
| *347 | STF 1334 | 38 Lyn | 15,8 | + 37 01 | 4,0-6,7 | 229 | 2,80 | | |
| 348 | STF 1331 | | 16,9 | + 61 34 | 8,0-8,0 | 154 | 0,91 | 1969 | |
| 349 | STF 1338 | | 17,9 | + 38 24 | 7,0-7,2 | 256 | 0,92 | 1980 Orb. | |
| 350 | STF 1340 | 39 Lyn | 19,2 | + 49 46 | 6,5-8,3 | 319 | 6,19 | | |
| 351 | STF 1348 | | 21,8 | + 6 34 | 7,5-7,6 | 317 | 1,99 | 1966 | |
| 352 | STF 1346 | | 22,1 | + 54 15 | 7,0-8,0 | 313 | 5,76 | 1957 | |
| 353 | STF 1355 | | 24,7 | + 6 27 | 7,2-7,2 | 343 | 2,20 | 1965 | |
| 354 | A 1588 | | 24,8 | - 9 00 | 7,2-7,2 | 197 | 0,27 | 1964 | |
| *355 | STF 1356 | ω Leo | 25,8 | + 9 17 | 6,2-7,0 | 14 | 0,47 | 1980 Orb. | |
| 356 | A 1985 | | 26,8 | + 42 29 | 8,0-8,0 | 28 | 1,33 | 1970 | N |
| 357 | STF 1351 | 23 U.Ma | 27,6 | + 63 17 | 3,8-9,0 | 271 | 22,8 | | |
| 358 | STF 1365 | | 29,0 | + 1 41 | 7,0-8,0 | 157 | 3,14 | 1974 | |
| 359 | STF 1362 | | 33,2 | + 73 18 | 7,0-7,0 | 127 | 4,71 | 1969 | |
| 360 | STF 1374 | | 38,3 | + 39 11 | 7,0-8,3 | 299 | 2,82 | 1969 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|------|----------|----------|----------|----------|---------|------|-------|-----------|---|
| 361 | KUI 44 | 20 Leo | 9h47m,0 | + 21°27' | 6,6-6,9 | 216° | 0",33 | 1971 | N |
| 362 | Ho 369 | | 48,2 | + 36 43 | 7,7-7,8 | 100 | 0,36 | 1973 | |
| *363 | STT 208 | φ U.Ma | 48,7 | + 54 18 | 5,0-5,6 | 100 | 0,24 | 1980 Orb. | N |
| 364 | AC 5 | 8 Sex | 50,0 | - 7 52 | 5,5-5,9 | 79 | 0,50 | 1980 Orb. | |
| 365 | STT 210 | | 59,4 | + 46 36 | 7,5-8,3 | 259 | 1,10 | 1966 | |
| 366 | STT 215 | | 10h13m,6 | + 17 59 | 7,0-7,2 | 181 | 1,38 | 1980 Orb. | |
| *367 | STF 1415 | | 13,9 | + 71 19 | 6,1-7,0 | 167 | 16,54 | 1958 | |
| 368 | STF 1421 | | 15,3 | + 27 47 | 7,5-8,5 | 330 | 4,44 | 1966 | |
| *369 | STF 1424 | γ Leo | 17,2 | + 20 06 | 2,0-3,5 | 122 | 4,33 | 1968 | N |
| 370 | STF 1426 | | 17,9 | + 6 41 | 7,8-8,3 | 302 | 0,85 | 1968 | |
| *371 | Hu 879 | β L. Min | 25,0 | + 36 58 | 4,0-6,5 | 227 | 0,50 | 1980 Orb. | N |
| 372 | STF 1450 | 49 Leo | 32,4 | + 8 55 | 6,0-8,7 | 158 | 2,20 | 1962 | |
| 373 | STF 1457 | | 36,1 | + 6 00 | 7,4-8,4 | 331 | 1,79 | 1967 | N |
| 374 | STF 1466 | 35 Sex | 40,8 | + 5 01 | 6,1-7,2 | 240 | 6,69 | 1974 | |
| 375 | STT 229 | | 45,2 | + 41 22 | 6,7-7,1 | 288 | 0,83 | 1968. | N |
| 376 | STF 1476 | 40 Sex | 46,8 | - 3 46 | 7,2-8,0 | 10 | 2,31 | 1961 | |
| *377 | STF 1487 | 54 Leo | 52,9 | + 25 01 | 5,0-7,0 | 110 | 6,44 | 1968 | |
| 378 | STF 1504 | | 11h01m,4 | + 3 55 | 7,5-7,6 | 117 | 1,25 | 1973 | |
| 379 | STF 1521 | | 12,7 | + 27 51 | 7,2-7,5 | 96 | 3,59 | 1971 | |
| *380 | STF 1523 | ξ U. Ma | 15,6 | + 31 49 | 4,0-4,9 | 105 | 2,92 | 1980 Orb. | |
| 381 | STF 1524 | ν U.Ma | 15,8 | + 33°22' | 3,7-9,9 | 148° | 7",21 | 1959 | |
| *382 | STF 1536 | t Leo | 21,3 | + 10 48 | 3,9-7,1 | 154 | 1,22 | 1980 Orb. | N |
| 383 | STF 1537 | | 21,8 | + 20 54 | 7,6-8,6 | 357 | 2,39 | 1969 | |
| 384 | h 840 | γ Cra | 22,4 | - 17 25 | 4,0-9,5 | 93 | 5,26 | 1968 | |
| *385 | STF 1540 | 83 Leo | 24,3 | + 3 17 | 6,3-7,3 | 150 | 28,70 | 1959 | N |
| *386 | STF 1543 | 57 U.Ma | 26,4 | + 39 37 | 5,2-8,2 | 358 | 5,34 | 1962 | |
| 387 | STT 234 | | 28,1 | + 41 34 | 7,0-7,4 | 116 | 0,26 | 1980 Orb. | N |
| 388 | STT 235 | | 29,5 | + 61 22 | 6,0-7,3 | 202 | 0,36 | 1980 Orb. | N |
| 389 | H III 96 | 17 Cra | 29,8 | - 28 59 | 6,0-6,0 | 210 | 9,10 | | |
| 390 | STF 1552 | 90 Leo | 32,1 | + 17 04 | 6,0-7,3 | 207 | 3,39 | 1968 | |
| 391 | STF 1555 | | 33,7 | + 28 03 | 6,4-6,8 | 140 | 0,50 | 1974 | |
| 392 | STF 1561 | | 36,2 | + 45 23 | 5,9-8,0 | 253 | 9,74 | 1958 | |
| 393 | STT 237 | | 36,3 | + 41 25 | 7,4-9,0 | 250 | 1,62 | 1971 | N |
| 394 | STT 241 | | 53,7 | + 35 44 | 6,5-8,4 | 141 | 1,75 | 1966 | |
| *395 | STF 1596 | 2 Com | 12h01m,7 | + 21 44 | 6,0-7,5 | 237 | 3,78 | 1956 | |
| 396 | STF 1606 | | 08,3 | + 40 10 | 6,3-7,0 | 264 | 0,38 | 1980 Orb. | |
| 397 | BU 920 | | 13,2 | - 23 04 | 6,5-7,0 | 278 | 1,17 | 1960 | |
| 398 | STF 1622 | 2 C.Ve | 13,6 | + 40 56 | 5,7-8,0 | 260 | 11,60 | 1958 | |
| 399 | STF 1625 | | 14,1 | + 80 25 | 6,5-7,0 | 219 | 14,4 | | |
| *400 | STF 1627 | | 15,6 | - 3 40 | 5,9-6,4 | 196 | 20,05 | 1951 | |
| 401 | STF 1639 | | 21,9 | + 25°52' | 6,7-7,9 | 326° | 1",49 | 1980 Orb. | |
| 402 | STT 250 | | 22,0 | + 43 22 | 7,7-8,0 | 343 | 0,45 | 1965 | |
| *403 | Sh 145 | δ Cor | 27,3 | - 16 15 | 3,0-7,5 | 212 | 24,2 | | |
| 404 | STF 1647 | | 28,0 | + 10 00 | 7,5-7,8 | 237 | 1,39 | 1966 | |
| *405 | STF 1657 | 24 Com | 32,6 | + 18 39 | 4,7-6,2 | 271 | 20,3 | 1958 | N |
| *406 | STF 1669 | | 38,7 | - 12 44 | 6,5-6,5 | 309 | 5,50 | 1957 | |
| *407 | STF 1670 | γ Vir | 39,1 | - 1 11 | 3,0-3,0 | 297 | 3,92 | 1980 Orb. | N |
| 408 | STF 1678 | | 42,9 | + 14 39 | 6,3-7,0 | 181 | 34,3 | 1958 | |
| *409 | STF 1694 | | 48,6 | + 83 41 | 4,9-5,4 | 326 | 21,50 | 1958 | |
| 410 | STF 1685 | | 49,4 | + 19 27 | 6,8-7,3 | 202 | 16,07 | | |
| *411 | STF 1687 | 35 Com | 50,8 | + 21 31 | 5,0-7,8 | 163 | 1,06 | 1980 Orb. | N |
| *412 | STF 1692 | α C.Ve | 53,7 | + 38 35 | 3,2-5,7 | 228 | 19,44 | 1974 | N |
| 413 | STT 256 | | 53,9 | - 0 41 | 7,2-7,6 | 89 | 0,92 | 1966 | |
| 414 | STF 1695 | | 54,1 | + 54 22 | 6,3-8,2 | 282 | 3,74 | 1955 | |
| 415 | STF 1699 | | 56,3 | + 27 45 | 7,8-7,8 | 7 | 1,64 | 1963 | |
| 416 | BU 928 | | 13h00m,8 | - 6 10 | 7,8-8,7 | 317 | 2,28 | 1965 | |
| 417 | BU 929 | 48 Vir | 01,3 | - 3 24 | 6,2-6,5 | 205 | 0,75 | 1966 | |
| 418 | COU 11 | 39 Com | 03,9 | + ,21 26 | 6,0-9,0 | 322 | 1,31 | 1975 | N |
| 419 | STF 1719 | | 04,8 | + 0 51 | 7,3-7,8 | 0 | 7,12 | | |
| 420 | STF 1722 | | 06,0 | + 15 46 | 7,8-8,8 | 337 | 2,80 | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|----------|---------|-----------|----------|---------|------|-------|-------------|
| *421 | STF 1724 | θ Vir | 13h,07m,4 | - 5°16' | 4,0-9,0 | 342° | 7",10 | |
| 422 | STF 1728 | 42 Com | 07,6 | + 17 47 | 6,0-6,0 | 191 | 0,49 | 1980 Orb. N |
| 423 | STT 261 | | 09,7 | + 32 21 | 6,9-7,4 | 340 | 2,24 | 1966 N |
| 424 | Sh 151 | 54 Vir | 10,8 | - 18 34 | 7,0-7,5 | 34 | 5,31 | 1952 |
| 425 | STT 263 | | 14,5 | + 50 50 | 7,7-8,5 | 136 | 1,92 | 1965 |
| 426 | STF 1734 | | 18,2 | + 3 12 | 7,2-7,9 | 182 | 1,14 | 1963 |
| *427 | STF 1744 | ζ U.Ma | 21,9 | + 55 11 | 2,1-4,2 | 150 | 14,54 | N |
| 428 | STT 266 | | 26,0 | + 15 58 | 7,3-7,8 | 350 | 1,97 | 1966 |
| 429 | STF 1755 | | 30,1 | + 37 05 | 7,0-7,9 | 131 | 4,31 | |
| 430 | STF 1757 | | 31,7 | - 0 04 | 7,8-8,9 | 114 | 2,19 | 1980 Orb. |
| 431 | BU 932 | | 32,0 | - 12 57 | 6,1-6,6 | 46 | 0,35 | 1980 Orb. |
| 432 | STF 1763 | 81 Vir | 35,0 | - 7 37 | 7,5-7,5 | 40 | 2,60 | 1958 |
| *433 | STF 1768 | 25 C.Ve | 35,2 | + 36 33 | 5,7-7,6 | 101 | 1,72 | 1980 Orb. |
| 434 | STF 1770 | | 35,7 | + 50 58 | 6,4-7,9 | 121 | 1,80 | 1967 |
| 435 | BU 612 | | 37,1 | + 11 00 | 6,0-6,0 | 188 | 0,23 | 1980 Orb. N |
| 436 | STF 1772 | l Boo | 38,3 | + 20 12 | 6,2-9,1 | 137 | 4,57 | 1963 |
| 437 | STF 1777 | 84 Vir | 40,6 | + 3 47 | 5,8-8,2 | 227 | 3,01 | 1974 |
| 438 | STF 1781 | | 43,6 | + 5 22 | 7,8-8,2 | 96 | 0,32 | 1980 Orb. N |
| 439 | STF 1785 | | 46,8 | + 27 14 | 7,2-7,5 | 159 | 3,41 | 1980 Orb. |
| 440 | STF 1788 | | 52,4 | - 7 49 | 6,7-7,9 | 92 | 3,35 | 1971 N |
| 441 | STF 1793 | | 56,8 | + 26°04' | 7,0-8,0 | 243° | 4",76 | 1956 |
| 442 | STT 276 | | 14h06m,1 | + 36 59 | 7,5-8,3 | 204 | 0,60 | |
| *443 | STF 1821 | xz Boo | 11,7 | + 52 01 | 5,1-7,2 | 237 | 13,24 | |
| 444 | STF 1816 | | 11,7 | + 29 20 | 7,0-7,1 | 86 | 0,92 | 1966 N |
| 445 | KUI 66 | 15 Boo | 12,4 | + 10 20 | 5,5-8,1 | 119 | 1,11 | 1971 N |
| 446 | STF 1819 | | 12,8 | + 3 22 | 7,9-8,0 | 239 | 0,82 | 1980 Orb. |
| 447 | STF 1825 | | 14,2 | + 20 21 | 6,8-8,5 | 162 | 4,36 | 1962 |
| *448 | STF 26 | i Boo | 14,4 | + 51 36 | 4,9-7,5 | 33 | 38,4 | |
| 449 | STF 1834 | | 18,5 | + 48 44 | 7,1-7,2 | 104 | 1,24 | 1980 Orb. |
| 450 | STF 1833 | | 20,0 | - 7 23 | 7,0-7,0 | 172 | 5,63 | |
| *451 | STF 1835 | | 20,9 | + 8 40 | 5,5-6,8 | 192 | 6,23 | N |
| 452 | STF 1838 | | 21,6 | + 11 28 | 7,2-7,3 | 333 | 9,43 | |
| 453 | STF 1837 | | 22,0 | - 11 27 | 7,1-8,7 | 283 | 1,22 | 1972 |
| 454 | STF 1846 | φ Vir | 25,6 | - 2 00 | 5,2-9,7 | 111 | 5,00 | 1958 N |
| 455 | STF 1850 | | 26,4 | + 28 31 | 6,1-6,7 | 262 | 25,54 | |
| 456 | STF 1863 | | 36,4 | + 51 48 | 7,1-7,4 | 68 | 0,64 | 1970 N |
| *457 | STF 1864 | π Boo | 38,4 | + 16 38 | 4,9-6,0 | 108 | 5,60 | |
| 458 | STF 1867 | | 38,6 | + 31 30 | 7,7-8,2 | 5 | 0,84 | 1974 N |
| *459 | STF 1865 | ζ Boo | 38,8 | + 13 57 | 3,5-3,9 | 306 | 1,11 | 1980 Orb. |
| 460 | STF 1871 | | 39,8 | + 51 37 | 7,0-7,0 | 304 | 1,81 | 1970 |
| *461 | STF 1877 | ε Boo | 42,8 | + 27°17' | 3,0-6,3 | 338° | 2",79 | 1963 N |
| 462 | STF 1879 | | 43,8 | + 9 52 | 7,8-8,8 | 90 | 1,49 | 1980 Orb. |
| 463 | BU 346 | | 45,7 | - 17 08 | 7,2-8,0 | 267 | 2,00 | 1952 |
| 464 | STF 1884 | | 46,2 | + 24 34 | 6,2-7,8 | 55 | 1,91 | 1963 |
| 465 | STF 1883 | | 46,4 | + 6 10 | 7,0-7,0 | 297 | 0,38 | 1980 Orb. N |
| *466 | BU 106 | μ Lib | 46,6 | - 13 57 | 5,4-6,3 | 358 | 1,83 | 1965 |
| 467 | A 1110 | | 47,2 | + 8 11 | 7,5-7,7 | 250 | 0,63 | 1970 |
| *468 | STF 1890 | 39 Boo | 48,0 | + 48 55 | 5,8-6,5 | 45 | 2,96 | 1956 |
| *469 | STF 1888 | ξ Boo | 49 | + 19 19 | 4,7-6,6 | 332 | 7,18 | 1980 Orb. |
| 470 | STT 287 | | 49,6 | + 45 08 | 7,5-7,6 | 346 | 1,10 | 1980 Orb. |
| 471 | STT 288 | | 51,0 | + 15 54 | 6,4-7,1 | 171 | 1,26 | 1980 Orb. |
| 472 | BU 348 | 2 Ser | 59,2 | + 0 03 | 5,1-7,4 | 111 | 0,57 | 1962 |
| 473 | STF 1904 | | 15h01m,6 | + 5 41 | 7,0-7,0 | 347 | 10,01 | |
| *474 | STF 1909 | 44 Boo | 02,2 | + 47 51 | 5,2-6,1 | 29 | 0,90 | 1980 Orb. N |
| 475 | STF 1910 | | 05,2 | + 9 25 | 7,0-7,0 | 211 | 4,38 | 1971 |
| 476 | COU 189 | | 09,8 | + 19 10 | 6,0-7,9 | 141 | 0,50 | 1973 N |
| 477 | STF 1919 | | 10,6 | + 19 28 | 6,1-7,0 | 9 | 23,92 | |
| 478 | STF 3091 | | 13,4 | - 4 43 | 7,7-7,7 | 229 | 0,45 | 1980 Orb. |
| *479 | STF 1932 | | 16,2 | + 27 01 | 5,6-6,1 | 250 | 1,40 | 1980 Orb. |
| 480 | STF 1931 | | 16,3 | + 10 37 | 6,2-7,6 | 169 | 13,26 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|----------|----------|----------|----------|---------|------|--------|-------------|
| 481 | BU 32 | 6 Ser | 15h18m,5 | + 0°54' | 4,7-9,3 | 19° | 3",08 | 1964 |
| *482 | STF 1937 | η C.Br | 21 ,1 | + 30 28 | 5,2-5,7 | 321 | 0 ,39 | 1980 Orb. N |
| *483 | STF 1938 | μ Boo BC | 22 ,6 | + 37 31 | 6,7-7,3 | 15 | 2 ,17 | 1980 Orb. N |
| 484 | STT 296 | | 24 ,7 | + 44 11 | 7,0-8,6 | 289 | 1 ,87 | 1963 |
| 485 | STF 1944 | | 25 ,2 | + 6 16 | 7,5-8,1 | 314 | 0 ,95 | 1970 |
| 486 | STF 1950 | | 27 ,8 | + 25 41 | 6,7-8,2 | 91 | 3 ,22 | 1966 |
| 487 | COU 610 | θ C.Br | 30 ,9 | + 31 32 | 4,1-7 | 206 | 0 ,59 | 1975 N |
| *488 | STF 1972 | π1 U.Mi | 32 ,1 | + 80 37 | 6,1-7,0 | 80 | 31 ,3 | |
| *489 | STF 1954 | δ Ser | 32 ,4 | + 10 42 | 3,0-4,0 | 178 | 3 ,95 | 1960 N |
| 490 | STT 298 | | 34 ,3 | + 39 58 | 7,0-7,3 | 211 | 0 ,76 | 1980 Orb. N |
| 491 | STF 1963 | | 35 ,9 | + 30 16 | 7,3-7,7 | 296 | 5 ,02 | 1955 |
| 492 | STF 1962 | | 36 ,0 | - 8 38 | 6,3-6,4 | 189 | 11 ,82 | 1958 |
| *493 | STF 1965 | ζ C.Br | 37 ,5 | + 36 48 | 4,1-5,0 | 304 | 6 ,25 | 1961 |
| 494 | STF 1967 | ν C.Br | 40 ,6 | + 26 27 | 4,0-7,0 | 126 | 0 ,39 | 1980 Orb. N |
| 495 | BU 619 | | 40 ,8 | + 13 50 | 6,5-7,0 | 357 | 0 ,64 | 1960 |
| 496 | STF 1989 | π2 U.Mi | 42 ,3 | + 80 08 | 7,1-8,1 | 27 | 0 ,62 | 1980 Orb. |
| 497 | STF 1984 | | 49 ,7 | + 53 03 | 6,2-8,5 | 275 | 6 ,50 | |
| 498 | STF 1985 | | 53 ,3 | - 2 03 | 7,0-8,1 | 345 | 5 ,95 | 1955 |
| 499 | STF 1988 | | 54 ,4 | + 12 37 | 7,5-8,2 | 256 | 2 ,25 | 1963 |
| 500 | STF 2034 | | 54 ,7 | + 83 46 | 7,5-8,0 | 112 | 1 ,27 | 1974 |
| 501 | STT 303 | | 58 ,6 | + 13°25' | 7,4-7,9 | 164° | 1",25 | 1962 N |
| *502 | STF 1998 | ξ Sco | 16h01m,6 | - 11 14 | 4,9-5,2 | 20 | 1 ,20 | 1980 Orb. N |
| *503 | H III 7 | β Sco | 02 ,5 | - 19 40 | 2,0-6,0 | 22 | 13 ,52 | N |
| *504 | STF 2010 | k Her | 05 ,8 | + 17 11 | 5,0-6,0 | 12 | 28 ,2 | |
| *505 | BU 120 | ν1 Sco | 09 ,1 | - 19 21 | 4,2-6,7 | 2 | 1 ,24 | 1970 N |
| 506 | STF 2021 | 49 Ser | 11 ,0 | + 13 40 | 6,7-6,9 | 348 | 4 ,26 | 1971 |
| *507 | STF 2032 | σ C.Br | 12 ,8 | + 33 59 | 5,0-6,1 | 233 | 6 ,66 | 1980 Orb. |
| 508 | STT 309 | | 17 ,6 | + 41 47 | 7,5-7,7 | 275 | 0 ,39 | |
| 509 | Sh 228 | 5 Oph | 22 ,6 | - 23 20 | 5,0-6,0 | 352 | 3 ,33 | |
| 510 | STF 2054 | | 23 ,1 | + 61 48 | 5,7-6,9 | 355 | 1 ,14 | 1968 |
| 511 | STT 312 | η Dra | 23 ,3 | + 61 38 | 2,1-8,1 | 143 | 5 ,30 | 1962 |
| 512 | STF 2049 | | 25 ,8 | + 26 06 | 6,5-7,5 | 200 | 1 ,21 | 1967 |
| *513 | Antarès | α Sco | 26 ,5 | - 26 20 | 1,0-6,5 | 275 | 2 ,91 | 1974 N |
| 514 | STF 2052 | | 26 ,7 | + 18 31 | 7,5-7,5 | 134 | 1 ,38 | 1980 Orb. |
| *515 | STF 2055 | λ Oph | 28 ,4 | + 2 06 | 4,0-6,1 | 13 | 1 ,33 | 1980 Orb. |
| 516 | STT 313 | | 30 ,9 | + 40 13 | 7,2-7,8 | 138 | 0 ,92 | |
| *517 | STF 2078 | 17 Dra | 35 ,0 | + 53 01 | 5,0-6,0 | 106 | 3 ,27 | 1966 |
| *518 | STF 2084 | ζ Her | 39 ,4 | + 31 41 | 3,0-6,5 | 142 | 1 ,26 | 1980 Orb. N |
| 519 | STF 2094 | | 42 ,1 | + 23 36 | 7,3-7,6 | 74 | 1 ,28 | 1966 |
| 520 | D 15 | | 42 ,4 | + 43 34 | 7,7-7,7 | 142 | 1 ,17 | 1980 Orb. |
| 521 | Mlr 198 | | 43 ,0 | + 73°59' | 7,3-7,6 | 214° | 0",26 | 1971 N |
| 522 | STF 2106 | | 48 ,7 | + 9 30 | 6,7-8,4 | 180 | 0 ,55 | 1980 Orb. |
| 523 | STF 2107 | | 49 ,8 | + 28 45 | 6,5-8,0 | 88 | 1 ,37 | 1980 Orb. |
| *524 | STF 2118 | 20 Dra | 56 ,2 | + 65 07 | 6,4-6,9 | 68 | 1 ,27 | 1980 Orb. |
| 525 | STF 2114 | | 59 ,6 | + 8 31 | 6,2-7,4 | 182 | 1 ,34 | 1970 |
| *526 | STF 2130 | μ Dra | 17h04m,3 | + 54 32 | 5,0-5,1 | 42 | 1 ,90 | 1980 Orb. |
| *527 | BU 1118 | η Oph | 07 ,5 | - 15 40 | 3,4-3,9 | 269 | 0 ,38 | 1980 Orb. N |
| 528 | STF 2135 | | 10 ,0 | + 21 17 | 7,1-8,4 | 187 | 7 ,85 | 1960 |
| *529 | Sh 243 | 36 Oph | 12 ,3 | - 26 30 | 6,0-6,0 | 154 | 4 ,63 | 1980 Orb. N |
| *530 | STF 2140 | α Her | 12 ,4 | + 14 27 | 3,0-6,1 | 107 | 4 ,87 | 1971 N |
| *531 | STF 3127 | δ Her | 13 ,0 | + 24 54 | 3,0-8,1 | 250 | 8 ,50 | 1969 N |
| 532 | A 2984 | 41 Oph | 14 ,0 | - 0 23 | 4,6-7,6 | 349 | 1 ,05 | 1974 |
| 533 | H III 25 | 39 Oph | 15 ,0 | - 24 14 | 6,0-7,0 | 355 | 10 ,8 | |
| 534 | BU 126 | | 17 ,0 | - 17 42 | 6,4-7,5 | 261 | 2 ,01 | 1967 |
| *535 | STF 2161 | ρ Her | 22 ,0 | + 37 11 | 4,0-5,1 | 316 | 3 ,96 | 1967 |
| 536 | STF 2168 | | 24 ,9 | + 35 48 | 7,5-8,2 | 199 | 2 ,39 | 1967 |
| 537 | STF 2180 | | 27 ,8 | + 50 55 | 7,0-7,2 | 261 | 3 ,07 | 1960 |
| 538 | STF 2173 | | 27 ,8 | - 1 01 | 5,8-6,1 | 349 | 0 ,49 | 1980 Orb. N |
| 539 | STF 2186 | | 33 ,3 | + 1 02 | 7,5-7,5 | 79 | 2 ,98 | |
| 540 | STF 2199 | | 37 ,7 | + 55 47 | 7,2-7,8 | 67 | 1 ,82 | 1968 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|----------|---------|----------|----------|---------|------|--------|-----------|
| 541 | STF 2203 | | 17h39,7 | + 41°41' | 7,5-7,8 | 303° | 0",76 | 1967 |
| 542 | STF 2218 | | 40,0 | + 63 42 | 6,5-7,7 | 327 | 1,80 | 1970 |
| 543 | H I 41 | | 40,8 | + 72 57 | 7,5-7,9 | 337 | 1,30 | 1968 |
| *544 | STF 2202 | 61 Oph | 42,0 | + 2 36 | 6,2-6,5 | 94 | 20,41 | |
| *545 | STF 2241 | Ψ Dra | 42,8 | + 72 11 | 4,0-5,2 | 15 | 30,34 | |
| 546 | STF 2213 | | 43,0 | + 31 09 | 7,5-8,0 | 329 | 4,51 | |
| 547 | STF 2204 | | 43,5 | - 13 18 | 7,0-7,2 | 24 | 14,46 | |
| 548 | STF 2215 | | 44,9 | + 17 43 | 5,9-7,9 | 275 | 0,61 | 1964 |
| 549 | STT 338 | | 49,7 | + 15 20 | 6,6-6,9 | 357 | 0,84 | 1967 |
| 550 | BU 130 | 90 Her | 51,7 | + 40 01 | 5,9-9,2 | 116 | 1,59 | 1966 |
| 551 | STF 2245 | | 54,2 | + 18 20 | 7,0-7,0 | 293 | 2,64 | |
| 552 | STF 2271 | | 59,2 | + 52 51 | 7,3-8,3 | 266 | 2,89 | 1966 |
| *553 | STF 2264 | 95 Her | 59,4 | + 21 36 | 4,9-4,9 | 258 | 6,29 | 1967 |
| *554 | STF 2262 | τ Oph | 18h00m,4 | - 8 11 | 5,0-5,7 | 276 | 1,85 | 1980 Orb. |
| *555 | STF 2272 | 70 Oph | 02,9 | + 2 32 | 4,1-6,1 | 324 | 2,20 | 1980 Orb. |
| 556 | STF 2276 | | 03,4 | + 12 00 | 6,0-7,0 | 257 | 6,92 | |
| 557 | STF 2282 | | 04,9 | + 40 21 | 7,2-8,2 | 85 | 2,46 | 1961 |
| 558 | AC 15 | 99 Her | 05,1 | + 30 33 | 6,0-9,0 | 4 | 1,46 | 1980 Orb. |
| *559 | STF 2280 | 100 Her | 05,8 | + 26 05 | 5,9-5,9 | 182 | 14,1 | |
| 560 | STF 2289 | | 07,9 | + 16 28 | 6,0-7,1 | 224 | 1,17 | 1963 |
| 561 | BU 132 | | 08,3 | - 19°52' | 6,8-7,2 | 198 | 1",44 | 1971 |
| 562 | STF 2294 | | 12,0 | + 0 10 | 7,4-7,7 | 93 | 1,02 | 1980 Orb. |
| 563 | AC 11 | | 22,4 | - 1 36 | 7,0-7,2 | 356 | 0,78 | 1980 Orb. |
| *564 | STF 2323 | 39 Dra | 23,2 | + 58 46 | 4,7-7,7 | 352 | 3,72 | 1962 |
| *565 | STF 2316 | 59 Ser | 24,6 | + 0 10 | 5,5-7,8 | 318 | 3,66 | 1962 |
| 566 | STF 2319 | | 25,6 | + 19 16 | 7,2-7,6 | 190 | 5,42 | |
| 567 | STT 354 | | 29,6 | + 6 45 | 7,2-8,0 | 195 | 0,73 | 1975 |
| 568 | A 1377 | | 32,8 | + 52 19 | 6,0-6,0 | 98 | 0,26 | 1980 Orb. |
| 569 | STT 359 | | 33,4 | + 23 34 | 6,6-6,9 | 9 | 0,60 | 1980 Orb. |
| 570 | STT 358 | | 33,6 | + 16 56 | 6,8-7,2 | 161 | 1,58 | 1980 Orb. |
| 571 | STT 357 | | 33,6 | + 11 41 | 7,5-7,6 | 97 | 0,34 | 1980 Orb. |
| 572 | STF 2368 | | 37,7 | + 52 18 | 7,2-7,4 | 144 | 1,80 | 1973 |
| 573 | STF 2369 | | 41,4 | + 2 34 | 7,5-8,0 | 76 | 0,53 | 1974 |
| *574 | STF 2382 | ε1 Lyr | 42,7 | + 39 37 | 4,6-6,3 | 358 | 2,54 | 1973 |
| *575 | STF 2383 | ε2 Lyr | | id | 4,9-5,2 | 92 | 2,20 | 1973 |
| 576 | STF 2375 | | 43,0 | + 5 27 | 6,2-6,6 | 118 | 2,51 | 1971 |
| *577 | STF 2379 | 5 Aqu | 43,9 | - 1 01 | 5,6-7,4 | 121 | 13,0 | |
| 578 | STF 2404 | | 48,4 | + 10 55 | 5,8-7,0 | 183 | 3,49 | 1966 |
| *579 | STF 2420 | o Dra | 50,4 | + 59 19 | 4,6-7,6 | 330 | 34,0 | |
| 580 | STF 2415 | | 52,4 | + 20 33 | 6,6-8,5 | 291 | 1,98 | 1969 |
| *581 | STF 2417 | θ Ser | 53,7 | + 4°08' | 4,0-4,2 | 103° | 22",24 | 1958 |
| 582 | STF 2422 | | 55,1 | + 26 02 | 7,6-7,7 | 80 | 0,64 | 1972 |
| 583 | STF 2438 | | 56,6 | + 58 09 | 7,0-7,6 | 2 | 0,89 | 1980 Orb. |
| 584 | Hd 150 | ζ Sgt | 59,4 | - 29 57 | 3,4-3,6 | 199 | 0,22 | 1980 Orb. |
| 585 | STF 2449 | | 19h04m,0 | + 7 05 | 7,1-7,8 | 290 | 8,16 | |
| 586 | STF 2455 | | 04,8 | + 22 06 | 7,2-8,3 | 36 | 3,02 | 1971 |
| 587 | STF 2486 | | 10,8 | + 49 45 | 6,0-6,5 | 212 | 8,23 | 1961 |
| *588 | STF 2487 | η Lyr | 12,0 | + 39 03 | 4,0-8,1 | 83 | 28,18 | |
| 589 | STT 368 | | 13,8 | + 16 04 | 7,3-8,5 | 218 | 1,12 | 1968 |
| 590 | STT 371 | | 13,9 | + 27 22 | 6,8-6,9 | 159 | 0,88 | 1963 |
| 591 | BU 248 | 2 Vul | 15,6 | + 22 56 | 5,7-9,5 | 127 | 1,78 | 1965 |
| 592 | STF 2492 | 23 Aqu | 16,0 | + 1 00 | 5,5-9,5 | 4 | 3,08 | 1958 |
| 593 | STF 2509 | | 16,4 | + 63 07 | 7,0-8,1 | 331 | 1,58 | 1969 |
| 594 | STF 2525 | | 24,5 | + 27 13 | 7,4-7,6 | 291 | 1,68 | 1980 Orb. |
| 595 | STF 2523 | | 24,6 | + 21 03 | 7,3-7,4 | 148 | 6,43 | 1953 |
| *596 | STF 43 | β Cyg | 28,7 | + 27 51 | 3,0-5,3 | 54 | 34,34 | 1956 |
| 597 | A 713 | | 29,8 | + 47 22 | 6,9-7,4 | 264 | 0,38 | 1972 |
| 598 | STF 2571 | | 31,8 | + 78 09 | 7,3-8,0 | 19 | 11,38 | 1962 |
| 599 | STT 378 | | 34,9 | + 40 54 | 7,2-9,0 | 287 | 1,42 | 1969 |
| 600 | STF 2545 | | 36,0 | - 10 16 | 6,2-8,1 | 322 | 3,74 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|----------|--------|----------|----------|---------|------|-------|-------------|
| 601 | STF 2556 | | 19h37m,3 | + 22°08' | 7,3-7,8 | 36° | 0",39 | 1980 Orb. |
| 602 | STT 382 | | 39,8 | + 27 16 | 7,1-7,6 | 332 | 0,36 | 1970 |
| 603 | STT 380 | | 40,2 | + 11 42 | 6,0-7,2 | 75 | 0,47 | 1962 |
| *604 | STF 46 | 16 Cyg | 40,6 | + 50 24 | 5,1-5,3 | 134 | 38,5 | |
| 605 | STT 384 | | 42,0 | + 38 12 | 7,0-7,3 | 195 | 0,94 | 1967 |
| *606 | STF 2579 | δ Cyg | 43,4 | + 45 00 | 3,0-7,9 | 233 | 2,29 | 1980 Orb. |
| 607 | STF 2576 | | 43,6 | + 33 30 | 7,8-7,8 | 356 | 2,03 | 1980 Orb. |
| 608 | STF 2578 | | 43,8 | + 35 58 | 6,6-7,4 | 125 | 14,78 | 1967 |
| 609 | STF 2580 | 17 Cyg | 44,5 | + 33 37 | 5,1-8,1 | 70 | 25,91 | 1960 |
| *610 | STF 2583 | π Aqu | 46,4 | + 11 41 | 6,0-6,8 | 108 | 1,51 | 1967 |
| 611 | STT 387 | | 46,8 | + 35 11 | 7,2-8,2 | 166 | 0,60 | 1980 Orb. |
| *612 | STF 2603 | ε Dra | 48,3 | + 70 08 | 4,0-7,6 | 14 | 3,10 | 1963 |
| 613 | STT 388 | | 50,2 | + 25 44 | 7,6-7,6 | 139 | 3,84 | 1954 |
| 614 | STF 2596 | | 51,7 | + 15 10 | 7,2-8,6 | 307 | 1,93 | 1970 |
| *615 | STF 2605 | ψ Cyg | 54,4 | + 52 18 | 5,0-7,5 | 177 | 3,10 | 1962 |
| 616 | AC 12 | | 55,8 | - 2 22 | 7,0-8,0 | 307 | 1,38 | 1970 |
| 617 | STF 2606 | | 56,6 | + 33 08 | 7,5-8,2 | 141 | 0,82 | 1972 |
| 618 | STF 2609 | | 56,8 | + 37 58 | 7,0-8,1 | 23 | 1,94 | 1966 |
| 619 | STF 2613 | | 59,0 | + 10 36 | 7,0-7,2 | 352 | 3,92 | 1967 |
| *620 | STT 395 | 16 Vul | 59,9 | + 24 48 | 5,8-6,2 | 119 | 0,79 | 1969 |
| 621 | STF 2624 | | 20h01m,6 | + 35°53' | 7,2-7,8 | 175° | 1",89 | 1969 |
| 622 | STF 2621 | | 02,2 | + 9 06 | 7,7-7,9 | 224 | 5,67 | |
| 623 | STF 2628 | | 05,4 | + 9 15 | 6,1-8,2 | 342 | 3,56 | 1958 |
| 624 | STF 2644 | | 10,0 | + 0 43 | 7,1-7,4 | 207 | 2,82 | 1967 |
| *625 | STF 2675 | x Cep | 10,7 | + 77 34 | 4,0-8,0 | 122 | 7,43 | |
| 626 | STF 2655 | | 11,9 | + 22 04 | 7,5-7,5 | 182 | 6,23 | 1956 |
| 627 | STT 403 | | 12,6 | + 41 57 | 7,0-7,2 | 172 | 0,89 | 1959 |
| 628 | BU 984 | | 15,5 | + 26 13 | 7,9-8,2 | 238 | 0,68 | 1967 |
| 629 | STF 2666 | | 16,4 | + 40 35 | 6,5-8,7 | 246 | 2,63 | 1965 |
| 630 | STF 2671 | | 17,2 | + 55 14 | 6,0-7,4 | 338 | 3,30 | 1959 |
| 631 | STT 406 | | 18,2 | + 45 12 | 7,1-8,0 | 117 | 0,58 | 1980 Orb. |
| 632 | A 730 | | 24,0 | + 59 26 | 6,8-7,0 | 322 | 0,23 | 1980 Orb. |
| *633 | BU 60 | π Cap | 24,5 | - 18 22 | 5,1-8,7 | 149 | 3,28 | 1966 |
| 634 | STT 407 | | 28,8 | + 11 05 | 7,0-7,5 | 255 | 16,75 | 1964 N |
| 635 | STF 2695 | | 29,8 | + 25 38 | 6,2-8,0 | 90 | 0,40 | 1975 N |
| *636 | BU 151 | β Del | 35,2 | + 14 25 | 4,0-5,0 | 5 | 0,59 | 1980 Orb. N |
| 637 | STF 2705 | | 35,8 | + 33 11 | 7,1-8,1 | 262 | 3,16 | 1961 |
| 638 | STF 2717 | | 36,8 | + 60 35 | 7,2-9,7 | 260 | 1,99 | 1965 |
| 639 | STT 410 | | 37,7 | + 40 24 | 6,4-6,7 | 9 | 0,85 | 1967 |
| 640 | STF 2716 | 49 Cyg | 39,0 | + 32 08 | 6,0-8,1 | 47 | 2,64 | 1969 |
| 641 | STF 2718 | | 40,2 | + 12°33' | 7,4-7,6 | 86° | 8",34 | |
| 642 | BU 152 | | 41,0 | + 57 12 | 7,2-8,0 | 88 | 0,98 | 1969 N |
| 643 | STF 2723 | | 42,5 | + 12 08 | 6,4-8,2 | 116 | 1,18 | 1960 N |
| 644 | STF 2726 | 52 Cyg | 43,6 | + 30 32 | 4,0-9,2 | 65 | 6,39 | |
| 645 | STF 2725 | | 43,9 | + 15 43 | 7,3-8,0 | 8 | 5,77 | 1967 N |
| *646 | STF 2727 | γ Del | 44,4 | + 15 57 | 4,0-5,0 | 268 | 10,02 | 1956 N |
| 647 | STT 413 | λ Cyg | 45,5 | + 36 18 | 5,0-6,3 | 25 | 0,84 | 1967 |
| 648 | S 763 | | 45,6 | - 18 23 | 6,5-7,2 | 293 | 15,80 | |
| 649 | STF 2730 | | 48,6 | + 6 12 | 7,8-7,9 | 335 | 3,31 | 1967 |
| 650 | STF 2729 | 4 Aqa | 48,8 | - 5 49 | 6,3-7,6 | 11 | 1,05 | 1975 |
| 651 | Ho 144 | | 50,1 | + 19 56 | 7,0-7,0 | 347 | 0,29 | 1971 |
| 652 | STT 416 | | 50,2 | + 43 34 | 7,8-8,1 | 125 | 8,41 | 1960 |
| 653 | STT 417 | | 51,0 | + 28 57 | 7,5-8,1 | 29 | 0,85 | 1967 |
| 654 | STT 418 | | 52,8 | + 32 31 | 7,3-7,4 | 286 | 1,14 | 1967 |
| 655 | STF 2735 | | 53,2 | + 4 20 | 6,2-7,7 | 286 | 1,99 | 1965 |
| 656 | STF 3133 | | 56,5 | + 61 10 | 7,4-8,9 | 101 | 3,26 | 1972 |
| 657 | STF 2737 | ε Equ | 56,6 | + 4 06 | 5,7-6,2 | 285 | 1,07 | 1980 Orb. N |
| 658 | STF 2741 | | 56,9 | + 50 16 | 6,0-7,3 | 27 | 1,91 | 1957 |
| 659 | STF 2742 | 2 Equ | 59,8 | + 6 59 | 7,1-7,1 | 219 | 2,62 | 1964 |
| *660 | STF 2744 | | 21h00m,5 | + 1 20 | 6,5-7,0 | 125 | 1,27 | 1980 Orb. |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|------|----------|--------|----------|----------|---------|------|------------|-----------|---|
| *661 | STF 2751 | | 21h00m,7 | + 56°28' | 6,0-7,0 | 353° | 1",61 | 1962 | |
| 662 | STF 2745 | 12 Aqa | 01,4 | - 6 01 | 5,6-6,7 | 193 | 2,68 | 1971 | |
| *663 | STF 2758 | 61 Cyg | 04,4 | + 38 28 | 5,6-6,3 | 146 | 29,04 | 1980 Orb. | |
| 664 | STF 2760 | | 04,7 | + 33 56 | 7,3-8,1 | 15 | 1,27 | 1975 | N |
| 665 | STF 2762 | | 06,5 | + 30 00 | 6,0-8,0 | 308 | 3,30 | 1962 | |
| 666 | STF 2767 | | 08,2 | + 19 45 | 7,8-8,2 | 30 | 2,39 | 1966 | |
| 667 | STF 2769 | | 08,3 | + 22 15 | 6,5-7,5 | 300 | 17,89 | | |
| 668 | STF 2765 | | 08,6 | + 9 21 | 7,8-8,0 | 81 | 2,68 | 1965 | |
| 669 | STT 431 | | 09,6 | + 41 02 | 7,6-8,0 | 123 | 2,85 | 1964 | |
| 670 | STF 2780 | | 10,5 | + 59 47 | 6,2-7,2 | 218 | 1,11 | 1956 | |
| 671 | STT 535 | δ Equ | 12,0 | + 9 48 | 5,3-5,4 | | dist. var. | | N |
| 672 | STT 432 | | 12,4 | + 40 56 | 6,8-7,2 | 120 | 1,32 | 1956 | |
| 673 | AGC 13 | τ Cyg | 12,8 | + 37 49 | 3,8-8,0 | 144 | 0,82 | 1980 Orb. | N |
| 674 | STF 2786 | | 17,2 | + 9 19 | 7,0-8,1 | 189 | 2,75 | 1965 | |
| 675 | STT 437 | | 18,7 | + 32 14 | 6,5-7,2 | 27 | 2,14 | 1962 | |
| 676 | STT 435 | | 18,9 | + 2 40 | 7,5-8,0 | 229 | 0,66 | 1971 | |
| 677 | STF 2801 | | 20,2 | + 80 08 | 7,3-8,0 | 272 | 1,88 | 1970 | |
| 678 | Ho 157 | | 20,9 | + 31 49 | 7,7-7,7 | 22 | 4,26 | | |
| 679 | COU 430 | | 22,8 | + 18 15 | 7,5-8,4 | 232 | 0,58 | 1975 | N |
| 680 | STF 2797 | | 24,3 | + 13 28 | 6,7-8,2 | 216 | 3,19 | 1965 | |
| 681 | STF 2799 | | 26,4 | + 10°52' | 7,0-7,0 | 273° | 1",68 | 1967 | |
| 682 | STF 2806 | β Cep | 28,0 | + 70 20 | 3,3-8,0 | 249 | 13,42 | 1962 | |
| 683 | STF 2804 | | 30,6 | + 20 29 | 7,3-8,0 | 349 | 3,15 | 1967 | |
| 684 | Hu 371 | | 33,2 | + 24 14 | 7,0-7,5 | 295 | 0,30 | 1980 Orb. | |
| *685 | STF 2822 | μ Cyg | 41,9 | + 28 31 | 4,7-6,1 | 298 | 1,81 | 1980 Orb. | |
| 686 | BU 989 | κ Peg | 42,4 | + 25 25 | 4,8-5,3 | 293 | 0,20 | 1980 Orb. | N |
| 687 | STF 2840 | | 50,3 | + 55 33 | 6,0-7,0 | 196 | 18,33 | 1958 | |
| 688 | STF 2843 | | 50,4 | + 65 31 | 7,0-7,2 | 145 | 1,56 | 1975 | |
| 689 | STT 456 | | 53,7 | + 52 17 | 7,8-8,0 | 35 | 1,48 | 1960 | |
| 690 | STT 457 | | 54,2 | + 65 04 | 6,3-8,5 | 245 | 1,14 | 1967 | |
| 691 | STT 458 | | 54,9 | + 59 32 | 7,1-8,6 | 350 | 0,84 | 1965 | |
| 692 | STF 2847 | | 55,5 | - 3 43 | 7,6-8,0 | 304 | 0,88 | 1971 | |
| 693 | BU 276 | η Ps.A | 58,0 | - 28 42 | 5,0-6,0 | 115 | 1,98 | | |
| 694 | STF 2873 | | 22h00m,4 | + 82 38 | 6,2-7,0 | 72 | 13,85 | | |
| 695 | STF 2854 | | 02,0 | + 13 24 | 7,7-8,0 | 84 | 1,94 | 1974 | |
| *696 | STF 2863 | ξ Cep | 02,2 | + 64 23 | 4,6-6,5 | 278 | 7,60 | 1962 | N |
| 697 | STF 2862 | | 04,5 | + 0 19 | 7,6-8,0 | 98 | 2,47 | 1970 | |
| 698 | COU 136 | | 07,7 | + 22 53 | 7,6-7,6 | 52 | 0,38 | 1974 | N |
| 699 | Sh 339 | 41 Aqa | 11,5 | - 21 19 | 5,7-7,7 | 116 | 4,96 | | N |
| *700 | STF 2893 | | 12,0 | + 73 04 | 5,5-7,6 | 348 | 29,1 | | |
| 701 | STF 2878 | | 12,0 | + 7°44' | 6,5-8,0 | 121° | 1",42 | 1962 | |
| 702 | STF 2881 | | 12,3 | + 29 20 | 7,7-8,2 | 85 | 1,37 | 1967 | |
| 703 | Ho 180 | | 13,7 | + 43 39 | 7,2-7,2 | 236 | 0,68 | 1961 | |
| 704 | STF 2903 | | 20,2 | + 66 27 | 7,0-8,0 | 96 | 4,19 | 1970 | |
| 705 | BU 172 | | 21,5 | - 5 06 | 6,7-6,7 | 277 | 0,27 | 1980 Orb. | N |
| 706 | Sh 345 | 53 Aqa | 23,8 | - 17 00 | 6,3-6,6 | 327 | 3,92 | 1966 | |
| *707 | STF 2909 | ζ Aqa | 26,2 | - 0 17 | 4,4-4,6 | 229 | 1,63 | 1980 Orb. | N |
| *708 | STF 1912 | 37 Peg | 27,4 | + 4 11 | 5,8-7,2 | 118 | 1,04 | 1980 Orb. | |
| 709 | Hu 981 | | 28,8 | + 61 22 | 7,5-7,7 | 226 | 0,35 | 1974 | |
| 710 | STF 2924 | | 31,6 | + 69 39 | 6,8-7,3 | 84 | 0,56 | 1980 Orb. | |
| 711 | A 1468 | | 32,2 | + 53 50 | 7,7-7,7 | 79 | 0,27 | 1970 | |
| *712 | STF 2922 | 8 Lac | 33,6 | + 39 23 | 6,0-6,5 | 185 | 22,44 | 1958 | |
| *713 | Ho 296 | | 38,4 | + 14 17 | 5,5-5,5 | 25 | 0,27 | 1980 Orb. | N |
| 714 | STF 2935 | | 40,4 | - 8 34 | 7,0-8,0 | 310 | 2,44 | 1962 | |
| 715 | STT 529 | | 43,4 | + 67 52 | 7,5-8,8 | 202 | 3,68 | 1966 | N |
| 716 | STF 2944 | | 45,3 | - 4 29 | 7,0-7,5 | 278 | 2,47 | 1967 | N |
| 717 | STF 2947 | | 47,3 | + 68 18 | 7,2-7,2 | 60 | 4,22 | 1962 | N |
| 718 | STF 2948 | | 47,8 | + 66 17 | 7,0-8,7 | 3 | 2,50 | 1965 | |
| 719 | Ho 482 | | 49,0 | + 26 08 | 6,8-6,8 | 39 | 0,34 | 1980 Orb. | |
| 720 | STF 2950 | | 49,4 | + 61 25 | 5,7-7,0 | 292 | 1,64 | 1970 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|------|----------|--------------|----------|----------|---------|------|--------|-----------|---|
| 721 | STF 2963 | | 22h53m,0 | + 76°04' | 7,8-8,5 | 357° | 1",95 | 1965 | |
| 722 | COU 240 | | 54 ,0 | + 22 41 | 7,4-7,8 | 289 | 0 ,64 | 1973 | N |
| 723 | STF 2971 | | 55 ,7 | + 78 13 | 7,3-8,5 | 4 | 5 ,50 | 1962 | |
| 724 | STT 483 | 52 Peg | 56 ,7 | + 11 28 | 6,2-7,7 | 300 | 0 ,68 | 1980 Orb. | |
| 725 | BU 180 | | 23h05m,0 | + 60 33 | 7,5-8,0 | 156 | 0 ,64 | 1957 | |
| *726 | STT 489 | π Cep | 06 ,3 | + 75 07 | 5,2-7,5 | 334 | 0 ,96 | 1980 Orb. | |
| 727 | BU 385 | | 07 ,9 | + 32 13 | 7,1-7,9 | 97 | 0 ,62 | 1974 | |
| 728 | STF 2988 | | 09 ,4 | - 12 13 | 7,2-7,2 | 101 | 3 ,51 | 1961 | |
| *729 | STF 3001 | σ Cep | 16 ,4 | + 67 50 | 5,2-7,8 | 217 | 2 ,90 | 1980 Orb. | |
| *730 | STF 2998 | 94 Aqa | 16 ,4 | - 13 44 | 5,2-7,2 | 350 | 12 ,97 | 1958 | |
| 731 | STF 3008 | | 21 ,2 | - 8 44 | 7,0-8,0 | 170 | 4 ,02 | 1968 | |
| 732 | STF 3017 | | 25 ,7 | + 73 49 | 7,1-8,2 | 25 | 1 ,56 | 1970 | |
| *733 | BU 720 | 72 Peg | 31 ,5 | + 31 03 | 6,0-6,0 | 80 | 0 ,51 | 1980 Orb. | |
| 734 | STT 500 | | 35 ,1 | + 44 09 | 6,1-7,0 | 353 | 0 ,48 | 1971 | |
| 735 | STT 503 | | 39 ,5 | + 20 01 | 7,2-7,8 | 132 | 1 ,16 | 1973 | |
| 736 | AGC 14 | 78 Peg | 41 ,4 | + 29 06 | 5,0-8,1 | 238 | 0 ,97 | 1970 | |
| *737 | Sh 356 | 107 Aqa | 43 ,4 | - 18 57 | 5,3-6,5 | 137 | 6 ,61 | 1962 | |
| 738 | STF 3037 | | 43 ,6 | + 60 12 | 7,0-8,5 | 211 | 2 ,70 | 1965 | |
| 739 | STT 507 | | 46 ,2 | + 64 36 | 6,8-7,5 | 305 | 0 ,71 | 1974 | |
| 740 | STT 508 | 6 Cas | 46 ,4 | + 61 57 | 5,7-8,2 | 196 | 1 ,55 | 1964 | |
| 741 | STT 510 | | 49 ,0 | + 41 48 | 7,5-7,8 | 131 | 0 ,49 | 1971 | |
| 742 | STF 3042 | | 49 ,3 | + 37 37 | 7,0-7,0 | 87 | 5 ,42 | 1953 | |
| *743 | STF 3049 | σ Cas | 56 ,4 | + 55 29 | 5,4-7,5 | 326 | 3 ,09 | 1954 | |
| *744 | STF 3050 | | 56 ,9 | + 33 27 | 6,5-6,5 | 309 | 1 ,55 | 1980 Orb. | N |

Les notes :

N° 11. La séparation augmente : 1861 276° 0",57.

N° 12. Mouvement orbital important 1889 54° 0",39 1920 84 0 ,44.

N° 19. Orange et bleu saphir (Flammarion).

N° 25. Accessible aux plus petits instruments. Jaune et lilas (Flammarion).

N° 31. Demande un objectif de 25 cm. La séparation diminue : 1876 92° 0",75.

N° 34. Les composantes s'écartent, mais l'objet est réservé aux grands objectifs : 1917 10° 0",18.

N° 39. Bon critère pour une ouverture de 40 cm. Mouvement orbital important :

1887 196° 0",25

1923 220 0 ,29

Depuis 1940, le quadrant est souvent inversé.

N° 45. La séparation augmente : 1875 74° 0",48.

N° 48. Accessible aux plus petites lunettes. Le compagnon est double, il a lui-même un compagnon de 11,0 à 1",18 vers 233°.

N° 51. Le compagnon est double très serré à 0",13.

N° 56. Demande de bonnes images et un excellent objectif. Se rapprochent:

1875 289° 1",34.

N° 59. Se rapprochent :

1831 88° 4",01.

N° 67. Étoile polaire. Le compagnon est accessible à une lunette de 6 cm, mais demande un peu d'habitude.

N° 71. Très facile. Se rapprochent :

1830 0° 8",63.

N° 77. Orange et émeraude (Flammarion). Un des plus beaux systèmes.

N° 78. Forme avec le précédent un système triple difficile pour les instruments moyens. Flammarion note les composantes verte et bleue, l'observation exige d'excellentes images.

N° 89. Une composante de 8,1 à 7,2. Jaune d'or, lilas et pourpre (Flammarion).

N° 90. Découverte en 1937. Critère type pour un miroir de 20 cm. N° 108. Un compagnon de 10,5 à 25".

N° 112. La primaire est double très serrée : 6,9-9,2 0",15.

N° 113. Se rapprochent :

1832 14° 3",59.

N° 115. Devient de moins en moins difficile :

1830 189° 0",55.

N° 118. La séparation décroît :

- 1875 87° 2",72.
- N° 121. Devient plus aisée :
1831 146° 1",34.
- N° 129. Découverte en 1968. Essayer l'observation à partir de 30 cm d'ouverture par bonnes images.
- N° 132. La primaire est double, découverte en 1968 7,4-8,1 20° 0",27.
- N° 140. Se rapprochent :
1830 105° 2",87.
- N° 142. Le compagnon est double: 7,2-9,8 255° 0",66 1962.
- N° 150. Découverte en 1937.
- N° 159. Cette étoile double est au milieu de l'amas H VII 47.
- N° 176. Découverte en 1938.
- N° 187. Découverte en 1934. Mouvement orbital direct avec diminution de la séparation : 1935 1° 1",13.
- N° 188. La primaire est une double réservée aux très grands instruments : 5,4-7,4 144° 0",23 1980 Orb.
- N° 189. 1829 99° 1",58.
- N° 194. S'écartent : 1843 227° 2",66.
- N° 199. Le satellite est double : 8,7-9,2 77° 0",35 1980 Orb.
- N° 204. La séparation est plus petite que ne l'indique l'orbite : 0"45 + .
- N° 206. Rigel. On peut voir le compagnon avec une petite lunette. Le compagnon est double lui-même à 0",1.
- N° 209. 1835 273° 1",42.
- N° 213. Le compagnon est double, mais pratiquement inobservable pendant quelques années :
1980 322° 0",10 8,0 8,1 Orb.
- N° 217. Devient très difficile. Demande maintenant un instrument de 30 cm.
1854 80° 0",82.
- N° 220. Une autre double dans le champ à 30" : 8,6-9,7 305° 0",65.
- N° 221. Découverte en 1972.
- N° 223. C'est le trapèze d'Orion dans la nébuleuse. Ce sont des astres jeunes, nés il y a moins d'un million d'années au sein de la nébuleuse.
- Na 228. S'écartent. Devient un bon critère pour un objectif de 95 mm.
1829 23° 0",67.
- N° 229. La primaire est double très serrée 0",1 à 0",2.
- N° 238. S'éloignent : 1871 6° 2",15.
- N° 243. Découverte en 1934.
- N° 244. Demande un bon objectif. Essayer avec une 162 mm. La primaire est variable de 3,3 à 4,2 en 230 jours.
- N° 247. Mouvement direct :
1830 89° 0",81.
- N° 251. Le compagnon est double très facile : 5,5-6,0 107° 2",89.
- N° 258. Devient difficile :
1830 249° 1",06.
- N° 259. Découverte en 1972. Pourtant accessible avec 15 cm d'ouverture.
- N° 262. Se rapprochent : 1846 137° 30",40.
- N° 263. Bon critère pour une 75 mm. Essayer avec une 61 mm. A 8",6 on trouve une 7,4.
- N° 264. Le compagnon de Sirius est la première naine blanche connue. On pourra essayer de le voir jusqu'en 1984 avec des instruments d'au moins 20 cm. Ensuite il sera trop près de l'étoile principale et invisible même dans les plus puissants instruments, jusqu'en l'an 2000.
- N° 269. Selon Flammarion le compagnon varie en éclat et en couleur. Tandis que la primaire est jaune d'or, le compagnon passe du vert au bleu, au pourpre et au rouge. Mouvement rétrograde :
1829 175° 5",73.
- N° 270. Se rapprochent : 1831 149° 3",67.
- N° 275. S'éloignent : 1830 159° 2",94.
- N° 277. L'orbite de Karmel donne des distances trop grandes.
- N° 282. Mouvement direct : 1829 197° 7",14.
- N° 283. Mouvement direct : 1831 115° 0",48.
- N° 289. Mouvement direct : 1831 292° 2",35.
- N° 291. Un des couples les plus lumineux du ciel. Bon critère pour les plus petites lunettes.
Mouvement orbital rapide : 1985 87° 2",68 Orb.
- N° 295. Dans le champ de Procyon. Couple type pour 10 cm :
1829 132° 1",46.
- N° 300. Découverte en 1937. Mouvement rétrograde :
1937 99° 0",18. C'est la primaire de BU 1062 6-13,5 à 4",2 36°. Essayer le système avec des

- miroirs de 30 à 40 cm.
- N° 301. Se rapprochent. Devient difficile pour les petites lunettes : 1831 17° 3",33.
- N° 303. Réservé aux grandes ouvertures. Le mouvement orbital est rapide avec d'importants changements en séparation :
1985 113° 0",15
1990 292 0 ,60 Orb.
- N° 305. Se rapprochent : 1831 267° 1",59.
- N° 306. L'écartement diminue : 1831 205° 2",37.
- N° 311. S'éloignent : 1829 71° 1",61.
- N° 312. & 313. Forment un système triple célèbre. Le mouvement du couple serré est rapide : 1985 239° 0",66 Orb.
- N° 315. Le compagnon est double très serré et très rapide : 1980 276° 0",16 Orb.
- N° 322. S'écartent : 1892 184° 0",39.
- N° 324. Pâle orange et bleu claire (Flammarion). Regarder avec une paire de jumelles.
- N° 325. Jaune et bleu. La primaire est une double très difficile : 4,0-5,5 155° 0",25 1980 Orb.
- N° 334. Le satellite est double : 9,5-9,8 201° 0",92 1980 Orb.
- N° 335. Découvert en 1936. Ce couple est toujours difficile, même au plus grand écartement. C'est une binaire rapide : 1985 326° 0",54 Orb.
- N° 337. Pour les grandes ouvertures. Mouvement orbital rapide : 275° 0",22 1985 Orb.
- N° 342. Se rapprochent : 1830 245° 3",48.
- N° 345. Mouvement orbital rapide : 212° 0",48 1985 262 0 ,20 1990 Orb.
- N° 356. S'écartent : 1909 35° 0",80.
- N° 361. Découvert en 1935. Essayer avec une ouverture de 30 cm.
- N° 363. Binaire rapide très serrée : 1985 137° 0",20.
- N° 369. Un des plus beaux couples du ciel. Deux diamants jaunes translucides(Flammarion). Accessible aux petites lunettes marines.
- N° 371. Binaire rapide. Importantes variations en distance : 1985 231° 0",39 Orb. Pas facile.
- N° 373. S'écartent : 1829 288° 0",71.
- N° 375. Bon critère pour une 162 mm. Mouvement rétrograde : 1846 347° 0",68.
- N° 382. La primaire est jaune. Le compagnon est variable, selon Flammarion ses couleurs passent du bleu au jaune, à l'indigo et au pourpre. A observer par bonnes images, rarement visible avec moins de 15 cm d'ouverture.
- N° 385. Blanche et rose pâle (Flammarion). Regarder le couple avec une paire de jumelles.
- N° 387. Pour les objectifs d'au moins 30 cm. Binaire rapide : 1985 135° 0",37 Orb.
- N° 388. Aussi difficile que la précédente. Binaire rapide 1985 256° 0",53 Orb.
- N° 393. S'écartent : 1847 287° 0",74.
- N° 405. Orange et lilas (Flammarion). A regarder avec une longue vue marine.
- N° 407. Un des couples les plus lumineux du ciel : 1985 292° 3",49 Orb.
- N° 411. Une étoile de 9 à 28".
- N° 412. Le Coeur de Charles. Une des plus jolies doubles du ciel selon Flammarion, jaune d'or et lilas. Regarder avec une longue-vue.
- N° 418. Découvert en 1959. La séparation augmente : 1959 321° 0",99.
- N° 422. Binaire rapide. Le plan de l'orbite contient l'observateur : 1985 192° 0",61 Orb.
- N° 423. S'écartent, est devenu assez facile : 1843 359° 0",63.
- N° 427. Mizar. C'est le deuxième Cheval du Grand Chariot. Son cavalier Alcor de magnitude 5, visible à l'oeil nu, est à 11'48". Bien voir dans le même champ Mizar, accessible aux plus petites lunettes, et Alcor pour comparer les écartements.
- N° 435. Pour les grandes ouvertures. Binaire rapide : 213° 0",32 1985 Orb.
- N° 438. 1985 126° 0",41 Orb.
- N° 440. Facile. S'écartent : 1831 54° 2",36.
- N° 444. Se resserrent : 1831 80° 1",87.
- N° 445. Découvert en 1939.
- N° 451. Le compagnon est une double difficile en mouvement orbital rapide : 26° 0",28 1980 50 0 ,26 1985 Orb.
- N° 454. S'écartent : 1829 109° 3",73.
- N° 456. Lent mouvement orbital : 1830 110° 0",65.
- N° 458. Se rapprochent : 1831 22° 1",63.
- N° 461. La «Pulcherrima », jaune éclatant et bleu marine (Flammarion). A essayer avec une lunette de 75 mm et même une 61 mm. Très lent mouvement : 1829 321° 2",64.
- N° 465. Mouvement rapide en séparation : 291° 0",53 1985 Orb.
- N° 474. Redevient accessible aux petits instruments. La séparation augmente rapidement : 39° 1",25

1985 Orb.

- N° 476. Découvert en 1967. Demande de très bonnes images.
- N° 482. Le couple est actuellement difficile, mais la séparation augmente : 10° 0",80 1985 Orb.
- N° 483. L'étoile principale μ Bootis est de magnitude 4 à 108" du couple BC.
- N° 487. Couple très lumineux découvert en 1971. On peut le voir avec 30 cm d'ouverture.
- N° 489. La séparation augmente : 1833 197° 2",66.
- N° 490. Devient difficile : 229° 0",47 1985 Orb.
- N° 494. Le compagnon se dégage, mais est réservé aux puissants instruments : 1985 121° 0",53 Orb.
- N° 501. La séparation augmente : 1846 111° 0",60.
- N° 502. Un compagnon de 7,2 à 54° et 7",7.
- N° 503. La primaire est une double très difficile, même dans les plus grands instruments : 2,0-9,7 105° 0",77.
- N° 505. La composante v2 à 40" est double elle-même : 7,0-8,0 54° 2",27. Le spectacle est très joli avec un objectif d'au moins 10 cm. Ressemble à e Lyre.
- N° 513. Antarès. Orange et verte. Aucun mouvement sensible depuis 1847. L'observer au crépuscule, un soir d'été.
- N° 518. Vraiment difficile. Exige un excellent objectif et une atmosphère calme : 1985 110° 1",44 Orb.
- N° 521. Découvert en 1971.
- N° 527. Bon critère pour un miroir de 25 cm : 1925 260° 0",44 Orb.
- N° 529. Facile. En mouvement propre commun avec 30 Scor. à 14' magnitude 7.
- N° 530. Orange et émeraude (Flammarion). La primaire est variable. Pour les petites lunettes.
- N° 531. Bleu clair et violette (Flammarion).
- N° 538. Rapide mouvement orbital : 1985 339° 0",83 Orb.
- N° 552. S'écartent : 1831 262° 1",88.
- N° 553. On ne peut mieux faire que citer Flammarion : « Jaune d'or et azur léger, couple extrêmement joli, très lumineux, ravissant petit tableau, couleurs variables. » (Les Étoiles p. 226.)
- N° 555. Très fine dans une petite lunette. Mouvement orbital important : 1980 287° 2",12 Orb.
- N° 573. Devient difficile, car les composantes se rapprochent : 1830 98° 1",54.
- N° 574. Avec une très bonne vue, on peut séparer à l'oeil nu ϵ_1 et ϵ_2 à 207". Une lunette de 56 mm suffit pour voir le spectacle.
- N° 576. Les deux composantes sont doubles très serrées à 0",1. N° 584. La séparation varie beaucoup, le mouvement est très rapide : 1985 72° 0",45 Orb.
- N° 586. Mouvement important avec séparation plus petite : 1828 144° 4",93.
- N° 596. Albiréo, un des plus beaux couples du ciel. Parait fixe depuis 1832. Jaune d'or et saphir (Flammarion). A voir avec une paire de jumelles.
- N° 634. Le compagnon est une double de plus en plus difficile à voir : 1846 212° 0",57 1975 256 0 ,15.
- N° 635. Se rapprochent après être passées à l'extrémité du grand axe apparent :
1831 76° 0",80
1883 78 1 ,16
1923 79 0 ,91
- N° 636. Mouvement orbital rapide : 1985 45° 0",25 Orb.
- N° 642. Mouvement rétrograde avec séparation croissante : 1876 111° 0",45.
- N° 643. La primaire est double très serrée.
- N° 645. La distance augmente : 1829 358° 4",24.
- N° 646. Orange et verte. Diminution de la séparation : 1830 274° 11",90.
- N° 657. Bon critère pour une lunette de 10 cm. Une composante de 7,1 à 10",2.
- N° 664. Mouvement rectiligne important, s'écartent de nouveau :
1829 223° 13",66
1888 225 7 ,74
1924 230 3 ,88
1940 236 2 ,20
1960 291 0 ,75
1965 334 0 ,59
- N° 671. Réservé aux puissants objectifs. Ce couple est une véritable horloge, sa période est de 5,7 ans. Voici une éphéméride :
1979,7 16° 0",26
1980,2 7 0 ,14
1980,7 248 0 ,05
1981,2 204 0 ,15
1981,7 183 0 ,09
1982,2 60 0 ,07

1982,7 36 0 ,19

1983,2 30 0 ,29

1983,7 27 0 ,34

N° 673. Devient de plus en plus difficile. A voir par images parfaites, avec un gros instrument : 1985 102° 0",54 Orb.

N° 679. Découvert en 1969.

N° 686. Binaire rapide, pour les miroirs d'au moins 50 cm : 1985 134° 0",22 Orb.

N° 696. Très facile. La distance augmente : 1831 289° 5",60

N° 698. Découvert en 1966, la séparation était de 0",24. Essayer avec un miroir de 25 cm.

N° 699. Jaune topaze et bleu ciel (Flammarion).

N° 705. Mouvement orbital : 1985 259" 0",23 Orb

N° 707. Bon critère pour les petites lunettes. Mouvement orbital : 1985 208° 1",65 Orb.

N° 713. Mouvement orbital rapide : 1985 112" 0",13 Orb.

N° 715. Une composante de 9,0 à 20",71.

N° 716. Se rapprochent : 1832 247° 4",12.

N° 717. S'écartent : 1832 76° 2",98.

N° 722. Découvert en 1967. Assez facile. Essayer avec 20 cm.

N° 744. Bon critère pour une lunette de 75 mm. 1985 316° 1",60 Orb.