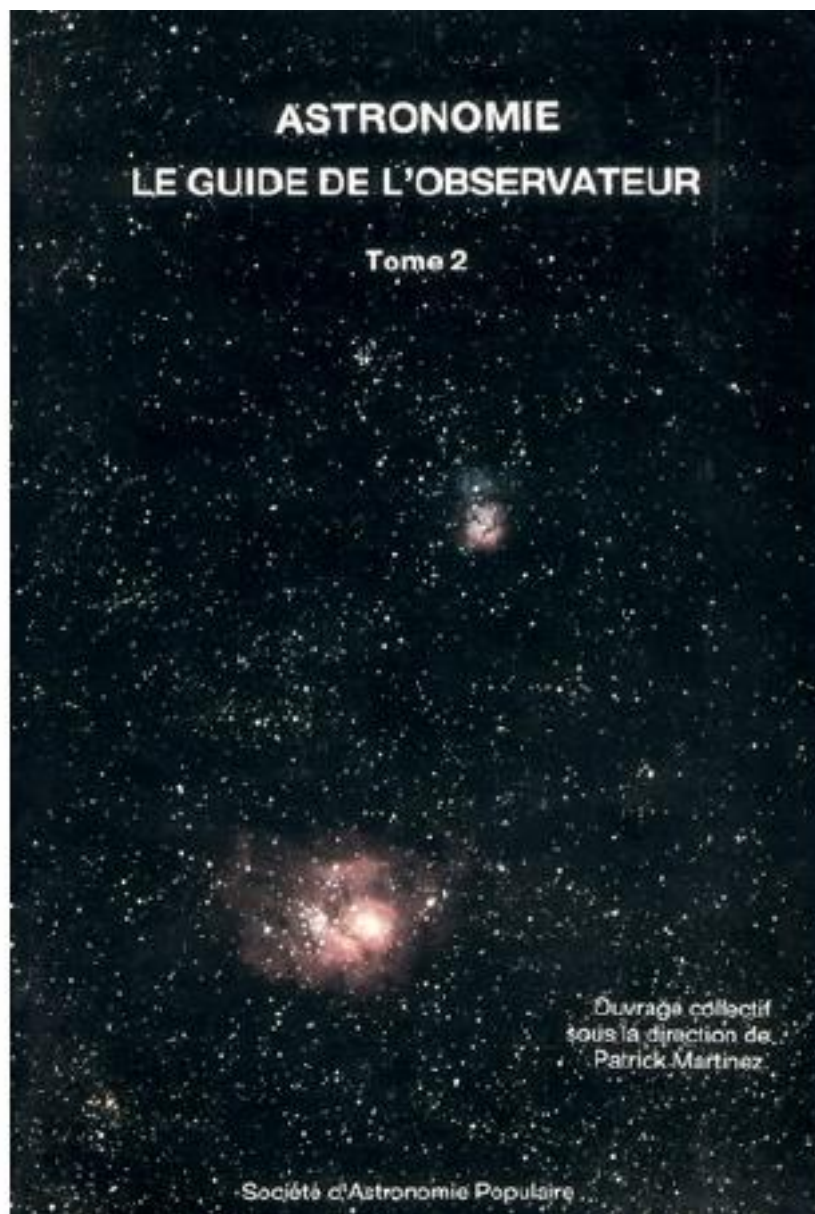


LES ÉTOILES DOUBLES ET MULTIPLES

par Pierre Durand, ancien Président et fondateur de la
Commission des Etoiles Doubles de la SAF
(extrait de Astronomie-Guide de l'Observateur T2, avec
l'autorisation de l'éditeur)



Sommaire :

1 - HISTORIQUE DES CONNAISSANCES

- 1.1 - LES PREMIÈRES DÉCOUVERTES
- 1.2 - L'ÉPOQUE DES PIONNIERS
- 1.3 - L'ÉPOQUE MODERNE
- 1.4 - LA NAISSANCE D'AUTRES MOYENS DE DÉTECTION
- 1.5 - LA NOUVELLE VAGUE

2 - POURQUOI S'INTERESSER AUX ÉTOILES DOUBLES?

- 2.1 - QUELQUES INFORMATIONS D'ACTUALITÉ
- 2.2 - OBSERVER POUR SATISFAIRE SA CURIOSITÉ
- 2.3 - UN TEST POUR L'INSTRUMENT ET POUR L'OBSERVATEUR
- 2.4 - SE METTRE LE COMPAS DANS L'OEIL
- 2.5 - PRENDRE LE RELAIS DES MESURES
- 2.6 - L'ÉDUCATION DE L'OEIL

3 - LES CATALOGUES

4 - LES TECHNIQUES DE MESURE: MÉTHODES VISUELLES

- 4.1 - CHOISIR UN INSTRUMENT ADAPTÉ
- 4.2 - UN ÉQUIPEMENT SIMPLE POUR COMMENCER LES MESURES
- 4.3 - LE MICROMÈTRE TOURNANT
- 4.4 - LE MICROMÈTRE EN V
- 4.5 - LE MICROMÈTRE A DIFFRACTION
- 4.6 - LE MICROMÈTRE A FILS
- 4.7 - LE MICROMÈTRE A ÉTOILES DE COMPARAISON
- 4.8 - LES MICROMÈTRES A DOUBLE IMAGE
- 4.9 - LE PHOTOMETRE A DOUBLE IMAGE
- 4.10 - LES MESURES PAR INTERFÉROMÉTRIE

5 - LES TECHNIQUES DE MESURE PAR EXPLOITATION D'IMAGES

- 5.1 - LA PHOTOGRAPHIE
- 5.2 - LES AUTRES SYSTÈMES DE MESURE

6 - LES PROBLÈMES LIÉS A LA MESURE DES ÉTOILES DOUBLES

- 6.1 - LES EFFETS DE LA TURBULENCE ATMOSPHÉRIQUE
- 6.2 - LE CHOIX DU SITE
- 6.3 - LE CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE MESURE
- 6.4 - L'IDENTIFICATION DE L'ASTRE A OBSERVER
- 6.5 - L'ÉTALONNAGE DES SYSTÈMES
- 6.6 - LE CHOIX D'UN PROGRAMME
- 6.7 - PUBLICATION DES MESURES

7 - EXPLOITATION DES MESURES

- 7.1 - LES ORBITES
- 7.2 - POURQUOI CALCULER DES ORBITES ?
- 7.3 - CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES
- 7.4 - DÉTERMINATION D'UNE ORBITE
- 7.5 - DÉTERMINATION DE TRAJECTOIRES RECTILIGNES
- 7.6 - LA PLACE DES ASTRONOMES AMATEURS DANS LE DOMAINE DES ÉTOILES DOUBLES

1 - HISTORIQUE DES CONNAISSANCES

1.1 - LES PREMIÈRES DÉCOUVERTES

Depuis que l'homme a contemplé la voûte céleste, il a remarqué que certaines étoiles étaient très rapprochées : Mizar et Alcor signalées par Al Sufi au x^{ème} siècle, ν Sgr que Ptolémée signale explicitement comme double (c'est la première fois donc que ce terme apparaît) au II^{ème} siècle. Toutes les deux sont séparées par une douzaine de minutes. Il fallu attendre ensuite l'invention de la lunette pour que Riccioli dirige son instrument sur Mizar en 1651 (encore elle) et la découvre double (10,45" de séparation). Puis ce furent le tour de θ Ori (Huygens), γ Ari (Hooke), α Cen (R.P. Richaud), γ Vir (Bradley) dans la décennie qui suivit, découvertes plus ou moins fortuites.

Nul doute que ces premiers observateurs considéraient de tels rapprochements comme exceptionnels, dus à la perspective, rapprochements que l'on désigne maintenant sous le vocable de couples optiques. Statistiquement, ces situations peuvent se présenter. On en connaît actuellement quelques centaines (environ 1 % des couples catalogués). Mais si l'on avait été capable à cette époque d'effectuer des calculs statistiques, on aurait sans doute pu imaginer une explication : celle fournie par l'intuition de deux visionnaires, J.H. Lambert (1761) et John Mitchell (1767), pour qui ces rapprochements d'étoiles ne pouvaient être le fait que d'une liaison gravitationnelle. Quelques temps plus tard, en 1777, l'Allemand Christian Mayer se lance dans une recherche systématique à l'aide de son quart de cercle (l'équivalent d'une lunette de 6 cm d'aujourd'hui), présentant fort justement l'existence d'un type d'objets particuliers.

En fait, la véritable notion moderne d'étoile double est à mettre à l'actif de W. Herschel, tout à fait par hasard d'ailleurs, comme beaucoup de grandes découvertes. Cherchant à déterminer les parallaxes d'étoiles, il mesurait la position d'étoiles brillantes (supposées proches) par rapport à leurs voisines moins lumineuses (supposées lointaines donc quasiment fixes). Ces mesures comportaient un angle de position dont le mouvement diurne fournissait l'origine et un calcul de la séparation à l'aide d'un micromètre à fils de soie de sa fabrication. Observant Castor, γ Leo, ϵ Boo, ζ Her, γ Vir avec ses fameux télescopes de 50 cm à 130 cm d'ouverture, il arrive à la conclusion, en 1803, que ces étoiles sont liées par leur attraction mutuelle. Ainsi, d'une simple curiosité, ces objets deviennent un élément d'une nouvelle cosmologie qui se met en place. Mais sans doute avait-il fallu que Newton soit passé par là, puisque Herschel décrit justement l'orbite elliptique de cinq couples étudiés : en particulier pour Castor, il détermine une période (durée pour qu'une étoile fasse une révolution autour de l'autre) de 342 ans (les calculs actuels donnent plutôt 500 ans). C'est le point de départ d'une nouvelle branche de l'astronomie. Il manquait un appareil pour ces mesures délicates. Il avait été imaginé par le Français Auzout dès 1666. Grâce aux progrès de la technologie, il servira aux successeurs de W. Herschel : ce sera le micromètre à fil.

1.2 - L'ÉPOQUE DES PIONNIERS

John, fils de William Herschel, commença dès 1816, en compagnie de South, une prospection du ciel, austral surtout, cataloguant 2 195 couples à l'aide des télescopes de son père. Dans le même temps, F.G.W. Struve, grâce au premier réfracteur moderne (objectif de 24 cm à deux lentilles, sur une monture équatoriale munie d'un bon entraînement installé à Dorpat), entreprend le même travail pour le ciel boréal et publie en 1837 l'oeuvre de base de l'astronomie des étoiles doubles. Dans « Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae », W. Struve expose ses méthodes de travail : prospection systématique, utilisation du micromètre à fil, détail des mesures effectuées entre 1824 et 1836, méthodes qui se sont codifiées ensuite. Il catalogue 3 134 objets entre 90 et — 15° de déclinaison, constituant ainsi la base des ouvrages ultérieurs.

Sur le terrain ainsi déblayé, s'installèrent alors de nombreux observateurs, amateurs pour la plupart : Mädler, Smyth, Dawes (l'oeil d'aigle !), Dembowski. Ce dernier, à Naples, avec des lunettes de 13 à 18 cm, enregistra 21 000 observations. Il ne faut pas oublier non plus le propre fils de Struve, Otto (affaire des amateurs, les doubles sont aussi des affaires de famille) qui, avec une puissante lunette, pour l'époque, de 38 cm, installée à Pulkovo, découvre 514 couples pour la plupart assez serrés, entre 1843 et 1850.

Parallèlement, J. Savary en 1827 sur UMa, et J. Herschel un peu plus tard, mettent au point la méthode mathématique permettant de déterminer les orbites des binaires observées (étoiles liées gravitationnellement). Les calculs d'orbite fixent les valeurs des caractéristiques orbitales : période, forme de l'ellipse et position de son plan dans le ciel.

Une nouvelle période commence avec l'entrée en scène des Américains. C'est un amateur encore qui découvre sa première double en 1870 avec une lunette de 13 cm. Il s'appelle S.W. Burnham. Sa réputation s'affirme et lui permet d'utiliser de puissants instruments d'observatoire : le 47 cm de Dearborn en collaboration avec Hough. Toujours avec de grands instruments, il entreprend de nouvelles recherches qui se soldent par la découverte de 1 336 couples. Surtout, ressentant le besoin d'un bilan général, il regroupe dans un catalogue les découvertes et les mesures réalisées sur le sujet : le General Catalogue - 1906.

1.3 - L'ÉPOQUE MODERNE

Burnham a inauguré le règne des grandes lunettes que prennent en charge, à sa suite, W.J. Hussey et surtout R.G. Aitken au merveilleux 91 cm de Lick. A partir de 1899, ces deux observateurs décident une revue méthodique du ciel à l'aide du catalogue AG en commençant à -22° de déclinaison pour remonter vers le pôle. En 1915, ils ont enregistré 4 434 étoiles doubles nouvelles ! Beaucoup sont très serrées, jusqu'à 0,10". Un nouveau pas vient d'être franchi.

En Angleterre, le R.P. Espin découvre aussi 4 000 couples, moins intéressants car vus avec des instruments moins puissants. Son compatriote Milburn effectue un travail important, de la même façon. En France, un autre amateur se distingue : R. Jonckheere qui découvre 3 350 doubles avec sa lunette de 33 cm (actuellement à Lille) et aux observatoires de Greenwich et de Marseille, jusqu'en 1945. Il s'agit surtout de couples peu lumineux choisis à dessein.

Dans l'hémisphère Sud, après J. Herschel, Innes continue une prospection au Cap et à Johannesburg. Il découvre 1 600 objets. Le flambeau est ensuite repris par Van den Bos et Finsen jusqu'en 1935 qui en recensent 3 200. De son côté, Rossiter à Bloenfontein en totalisera plus de 7 000 en 1946.

Le besoin de recenser toutes ces informations se fait à nouveau sentir. En 1932, Aitken publie un nouveau catalogue, l'A.D.S., contenant 17 180 doubles et multiples rassemblant les mesures de chacune en moyennes annuelles. Pour l'hémisphère Sud, Innes en publie un en 1899.

D'autres observateurs se sont aussi distingués : Van Biesbrock à Yerkes ; en Allemagne, Rabe ; en Belgique, Arend ; pour la Hollande, Voûte à Java. En France, l'intérêt a toujours été soutenu grâce à Giacobini, Perrotin, Flammarion qui publia le premier catalogue d'orbites, et, plus près de nous, grâce à des amateurs d'exception comme V. Duruy et P. Baize. Ce dernier, auteur de 24 000 mesures, surtout à l'observatoire de Paris, a acquis une renommée mondiale. Membre de l'U.A.I. (Union Astronomique Internationale), il publie encore dans « Astronomy and Astrophysics » des orbites d'étoiles doubles (il en a calculé près de 300). Président d'honneur de la Commission des Etoiles Doubles de la Société Astronomique de France, il constitue pour les amateurs l'exemple à suivre.

1.4 - LA NAISSANCE D'AUTRES MOYENS DE DÉTECTION

Les découvertes successives de nouveaux récepteurs vont créer des sous-catégories dans cette branche de l'astronomie. En 1857, Bond appliqua la photographie à l'observation des étoiles doubles sur Mizar (encore une première) et Rutherford développa le principe des mesures photographiques. Grâce au champ couvert, les positions des composantes ont pu être rapportées à d'autres étoiles, permettant un calcul des positions absolues. Ce fut un moyen d'observer la trajectoire festonnée de quelques étoiles, prouvant l'existence d'un compagnon invisible, tel fut le cas de Sirius B. On baptisa ces objets binaires astrométriques (qu'ils soient découverts par des observations méridiennes ou par la photo, comme à Sproul). La photographie a fait entrer dans les catalogues un grand nombre de couples faibles et écartés ; elle a surtout amélioré la précision des mesures des doubles pas trop serrées : entre 1,5 et quelques dizaines de secondes d'arc.

Plus riche est le domaine des binaires spectroscopiques qui s'ouvre en 1889 sur Algol et, en 1890, sur Mizar (toujours elle), grâce à Pickering. Lorsqu'on étudie le spectre d'une étoile, on remarque une succession de raies claires (en émission) ou sombres (en absorption). La position de ces raies est connue. Si l'étoile est en mouvement relatif par rapport à l'observateur, ces raies sont décalées à cause de l'effet Doppler-Fizeau d'une valeur $\lambda/\lambda = V_r/c$ où λ est la longueur d'onde, V_r la vitesse radiale et c la vitesse de la lumière. Si l'étoile est une binaire, lorsque l'une se rapproche et que l'autre s'éloigne à cause du mouvement orbital, on observe alors un dédoublement des raies. Cette méthode permet de découvrir des couples beaucoup plus serrés que le pouvoir séparateur des télescopes et, par la mesure des spectres, de calculer partiellement les orbites. Malheureusement, nécessitant de grands instruments et des équipements coûteux, elle n'est guère à la portée de l'amateur. La spectroscopie a néanmoins apporté à l'astronomie la connaissance d'un millier de binaires très serrées.

A la même époque, Fizeau et Michelson proposaient d'utiliser l'interférométrie pour mesurer les couples serrés et, enfin, en 1919, Pease et Anderson obtinrent au Mont Wilson les franges d'interférence des composantes A et B de Capella, déjà connue comme binaire spectroscopique. Cet appareillage offre la possibilité de dépasser le pouvoir séparateur des télescopes ; il a permis la découverte de couples nouveaux très serrés aussi.

Enfin, l'étude des binaires à éclipses s'est développée. Depuis 1670, on connaissait les variations de luminosité périodiques de β Per (Algol) et, dès 1783, Goodricke proposa d'interpréter le phénomène comme l'effet du passage d'un compagnon sombre devant un astre plus lumineux. La spectroscopie confirma son hypothèse. Actuellement, près de 5000 binaires à éclipses sont recensées ; elles intéressent hautement les astrophysiciens. Elles permettent aussi aux duplicistes d'avoir un sujet d'étude commun avec les variabilistes.

1.5 - LA NOUVELLE VAGUE

La période 1940-1960 assura les acquis. On pensait que les grands « surveys » américains avaient rempli les catalogues et qu'il n'y avait plus rien à découvrir, quand l'équipe des observateurs niçois s'aperçut que le ratissage avait été incomplet. P. Muller et P. Coureau reprennent la prospection à partir de l'AGK3, dans les années 60, à l'aide de la très bonne lunette de 50 cm. La moisson rapporte actuellement 3 000 couples presque tous serrés. D'autres observateurs s'y mettent : Heintz, Worley, l'observatoire de Belgrade, prouvant qu'après la grande rafle Aitken-Hussey, il reste encore des doubles à découvrir. Cela a fait dire à P. Muller qu'il s'agissait d'un travail de Sisyphe.

En France toujours, naît une nouvelle méthode de mesure à partir de 1970, grâce à A. Labeyrie, basée sur l'interférométrie, qui permet d'utiliser le pouvoir séparateur limite des grands télescopes : l'interférométrie des tavelures (speckle interferometry), spécialité du C.E.R.G.A. (Bonneau, Foy), de Kitt Peak (Mac-Alister), de Zelentchoukskaïa (Balega, Tokovinin) qui apporte depuis une dizaine d'années des mesures précises de couples serrés. De son côté, dans les années 1990, Paul Coureau pratique la tavelographie visuelle au télescope de 2 m du Pic du Midi, lui permettant d'observer la séparation de couples jusqu'à 0,05''.

Sans chauvinisme, il faut citer encore P. Lacroute, cheville ouvrière du satellite Hipparcos, futur grand mesureur d'étoiles doubles (environ 20 000) à partir de août 1989, grâce au travail de J. Dommangeat (Uccle). Ce dernier, avec son équipe, reconstitue un catalogue moderne, saisissable par informatique, contenant des objets vérifiés avec des positions précises : le Catalogue des Composantes d'Etoiles Doubles et Multiples (C.C.D.M.), remplaçant l'énorme compilation que constituait l'I.D.S. (Index Double Stars) de Jeffers et Van den Bos, édité par Lick en 1963 et contenant 64 000 entrées. En 1983, est paru aussi un catalogue de 847 systèmes en orbite (Worley-Heintz). En 1988, Worley compile l'ancien index pour réaliser le WDS (Washington Double Stars), régulièrement mis à jour.

Globalement, les doubles recensées atteignent plus de 100 000 en 1990, toutes catégories confondues, ce qui laisse penser que trois étoiles sur quatre sont dans des systèmes doubles ou multiples.

2 - POURQUOI S'INTERESSER AUX ETOILES DOUBLES ?

2.1 - QUELQUES INFORMATIONS D'ACTUALITÉ

Dès la parution des premiers catalogues, vers le milieu du siècle dernier, les astronomes ont toujours cherché à analyser les données recueillies. Les statistiques portant sur population-magnitude, population-séparation, population-classe spectrale ont laissé entrevoir de nouvelles voies de recherche.

Une notion s'est peu à peu imposée à l'examen des résultats : la sélection observationnelle. Les moyens d'observation, à cause de leurs limites, ont laissé des « trous ». Ces manques ont permis de définir de nouvelles directions de recherche.

Actuellement, les spécialistes s'accordent sur le fait que le phénomène étoiles-multiples montre une proportion stable quelles que soient la magnitude et la séparation. Or, on ne compte que 27 % de couples moins lumineux que $m=11$. Pour une grande partie, ce sont des astres éloignés. Les cas connus présentent un compagnon écarté, donc sur une orbite à très longue période. Mais si l'astre possède un grand mouvement propre, il s'agit d'une étoile proche et peu lumineuse, une naine le plus souvent : un

compagnon pourra être détectable. De la même manière, on conçoit que les couples à grande différence de magnitude (on dit à grand « delta m » (Δm) dans le jargon) ne peuvent être que proches. C'est le cas de Sirius, et de η Cas. Les couples plus éloignés sont obligatoirement plus équilibrés pour être perceptibles.

Le tableau XII.1 montre une répartition par type spectral et par séparation portant sur 70 000 couples. Il prouve que le phénomène étoile double se répartit comme les étoiles simples. Le déficit aux faibles séparations se comble rapidement grâce aux « surveys » modernes (Couteau, Muller, Heintz).

Type spectral	O	B	A	F	G	K	M
% d'étoiles doubles	rare	8	25	26	22	16	3

Séparation	$\leq 0,25''$	$< 0,5''$	$< 1''$	$< 2''$	$< 5''$
% d'étoiles doubles	2	7	14	23	47

Tableau XII.1 - Statistiques sur 70 000 couples (1975) d'après P. Couteau.

On doit préciser aussi que les mesures photométriques (P. Muller) montrent que, dans les étoiles multiples, toutes les associations spectrales se rencontrent.

Du côté des orbites des doubles visuelles, nous en sommes actuellement autour du millier, mais ce nombre risque d'augmenter rapidement du fait de la découverte récente de couples serrés contenant évidemment un bon nombre d'orbitales à courte période.

L'on peut se demander encore si un lien unit les étoiles multiples et les amas ouverts, si une continuité logique existe entre les deux. La figure XII.1 montre une différence de nature entre ces deux types d'objets, nature qui est explicitée par la figure XII.2. Les étoiles doubles sont, par essence, par nature, des systèmes hiérarchisés à la manière du système solaire : Soleil-planète-satellite. Grâce à la variété et à la complémentarité des moyens d'observation utilisés, on peut observer jusqu'à 4 niveaux (voir figure XII.3). Et tous les cas de la sorte ne sont pas connus...

Ces constatations expliquent qu'il reste encore à découvrir, à faire, et qu'un programme d'observation en ce domaine doit se réfléchir. Il reste de nombreuses cases vides à remplir qui sont autant de recherches que les astronomes amateurs peuvent entreprendre avec leurs moyens, même modestes, pour faire oeuvre utile. Nous allons examiner tout cela dans ce qui suit.

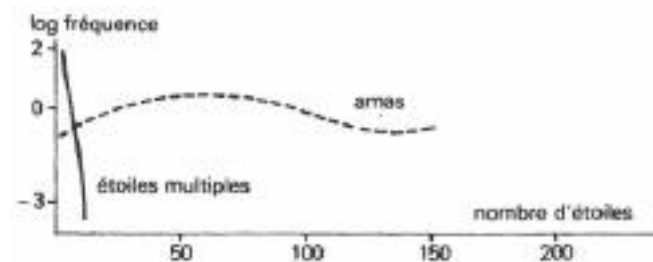


Figure XII.1 - Etoiles multiples et amas : deux types d'objets bien différents, d'après J. Dommanget.

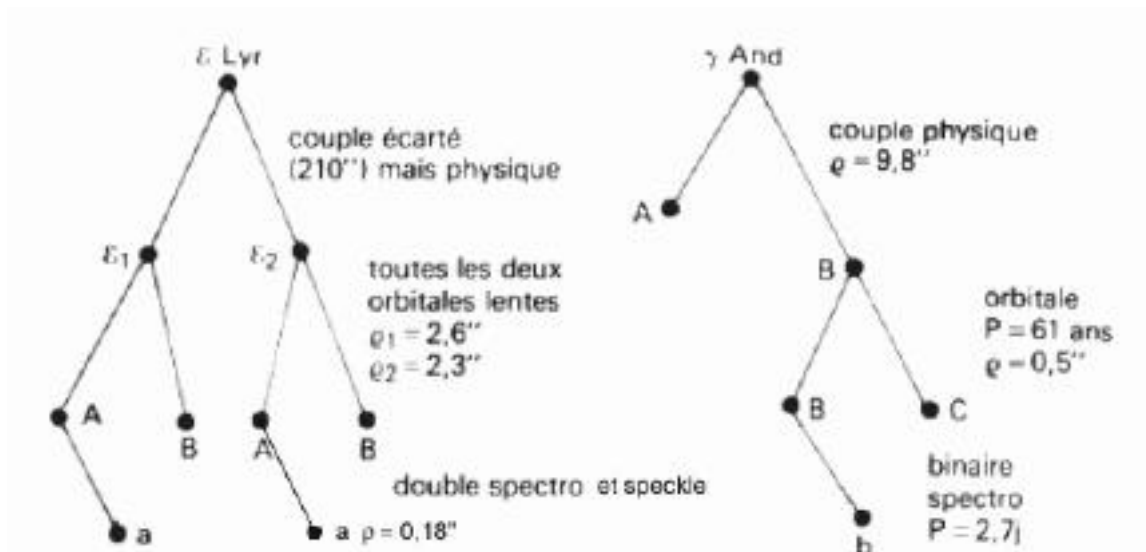


Figure XII.2 - Deux familles hiérarchisées d'étoiles multiples.

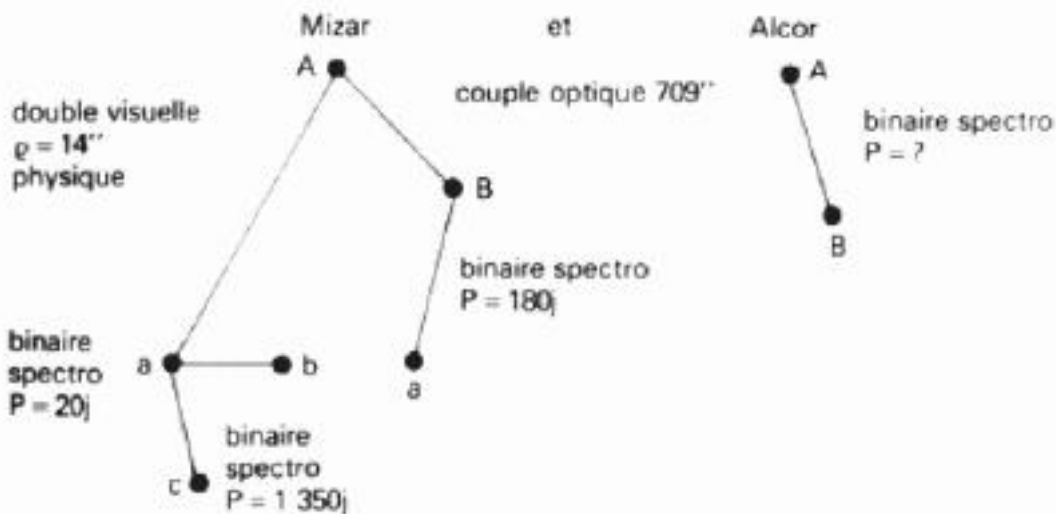


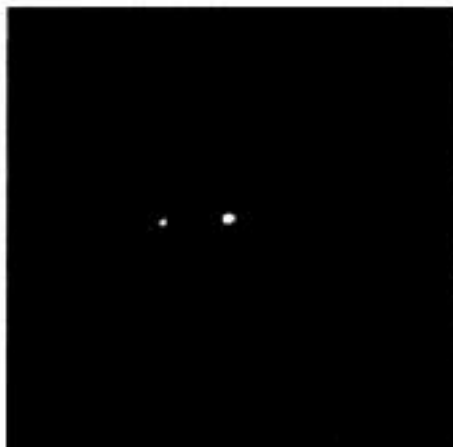
Figure XII.3 - Une famille nombreuse ! 8 membres sont connus...

2.2 - OBSERVER POUR SATISFAIRE SA CURIOSITÉ

Le premier intérêt qu'offre l'observation des étoiles doubles est la satisfaction du besoin de contempler tout ce qui est curieux dans le ciel. Elles sont l'objectif privilégié de l'astronome amateur citadin qui veut dépasser le système solaire. En effet, un ciel pur n'est pas la condition nécessaire pour partir avec sa lunette ou son télescope à la découverte « des diamants célestes » (expression attribuée à Flammarion). Il suffit que la turbulence, l'agitation des images, ne soit pas trop importante. Tous les moyens d'observation offrent des satisfactions, pourvu qu'on limite ses ambitions aux possibilités du matériel. Des couples du type ϵ_1 - ϵ_2 Lyr sont largement accessibles aux jumelles qui peuvent atteindre 30" de séparation. Dans de bonnes conditions, un télescope de 40 cm optiquement correct peut montrer une binaire à 0,25" seulement de séparation. Entre ces deux extrémités, il existe des dizaines de milliers d'objets accessibles à tous les types d'appareils (voir le petit catalogue du tableau XXII.4).

L'oeil ne peut rester insensible aux oppositions colorées, au chatolement que nous montrent Albireo ou ϵ Boo, ni à la pureté de deux disques d'Airy accolés, auréolés d'anneaux discrets, vus lors d'une nuit exceptionnellement calme. Il ne faut pas oublier non plus la satisfaction plus psychologique d'apercevoir une double aux limites de l'instrument alors qu'on ne sait pas encore si l'étoile est ronde ou allongée et qu'un calme subit vient, avec finesse et précision, rendre la striction des deux composantes évidente, d'une évidence à vous faire pousser des exclamations dans le silence nocturne.

Figure XII.4 - Une étoile double visuelle photographée avec un télescope de 20 cm, $F=12,5m$, agrandie 15 fois environ au tirage. Il s'agit de Gamma Dauphin (magnitudes 4,5-5,4 ; la mesure donne $\theta = 266,7''$, $\rho = 9,45''$ le 31/08/84 sur Fuji 400, pose 2s. Photo Durand-Simier.



2.3 - UN TEST POUR L'INSTRUMENT ET POUR L'OBSERVATEUR

Les étoiles doubles présentent un bon critère pour apprécier les qualités optiques de son instrument. L'image donnée par une étoile est, rappelons-le, constituée par le faux disque ou disque d'Airy entouré d'anneaux successifs de luminosité décroissante. Généralement, on ne distingue que le premier. Le rayon de ce faux disque dépend essentiellement de l'effet causé par le phénomène de diffraction résultant de l'existence de l'ouverture circulaire de l'instrument. Une formule donne la valeur de ce rayon : $R('') = 14/D(\text{cm})$, valeur qui convient pour les étoiles brillantes car, en réalité, ce disque présente une distribution spatiale décroissante de la lumière du centre vers le bord. Des étoiles d'éclat décroissant vont donc se montrer comme des disques de moins en moins gros. Et au-delà d'un seuil, le disque cesse d'être perceptible : on ne voit plus qu'une faible lueur. C'est dire la difficulté de séparer visuellement une binaire serrée dont les disques ne sont plus vus. L'expérience montre qu'au-delà d'une magnitude de 4,5 valeurs inférieure à la magnitude limite théorique de l'instrument, la tache n'est plus visible. Mais cela dépend beaucoup de l'oeil de l'observateur ; le tableau XII.2 n'est à utiliser qu'à titre indicatif. Cela suppose encore que le grossissement soit suffisant de l'ordre de deux fois le diamètre de l'objectif en mm.

Magnitude limite	10	9,5	8,6	8	7,3	6,5
Diamètre objectif	40 cm	30 cm	21 cm	15cm	11 cm	6 cm
Grossissement	800	600	420	300	220	120

Tableau xli.2 - Conditions pour observer encore la tache de diffraction avec une ouverture donnée (résultats empiriques).


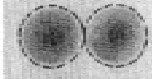



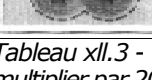
Aspect	Analyse de l'image	Séparation par rapport au faux disque	Séparation correspondante pour $D = 20\text{cm}$
	images séparées	1	0,70''
	images tangentes	0,95	0,66''
	images en huit	0,90	0,63''
	huit écrasé ($12/D$)	0,85	0,60''
	images étranglées	0,80	0,56''
	images en bâtonnet	0,75	0,52''

Tableau xli.3 - Valeur de la séparation d'un couple suivant l'aspect de l'image. Pour un autre diamètre que 20 cm, multiplier par $20/D(\text{cm})$.

Dans ces conditions, on découvre que la diffraction offre à l'observateur un micromètre naturel. On pourrait objecter que le disque perçu se réduisant avec l'éclat de l'étoile, il devrait être possible de voir des couples faibles plus serrés. En fait, à l'usage, on constate que la baisse de luminosité fait perdre à l'oeil son pouvoir séparateur et que la capacité de séparation de deux étoiles proches est pratiquement constante quelle que soit leur luminosité. Le tableau XII.3 permet de transformer l'aspect d'un couple serré en séparation (secondes d'arc). Il tient compte de ce que l'image géométrique des deux composantes non séparées, observées au foyer d'un instrument, ne correspond plus à celle qui devrait être réellement donnée à cause de l'effet d'accentuation du rapprochement (P. Couteau, L'observation des étoiles doubles, p. 43).

Il est encore nécessaire de dire un mot sur la limite de résolution de $12/D(\text{cm})$, proposée par Dawes. Elle correspond à un optimum arbitraire où les centres des deux astres sont distants de 85 % du rayon du disque d'Airy. La figure alors observée montre deux taches se superposant, la zone médiane restant encore peu lumineuse. Cela permet à l'oeil de conclure à la duplicité. Un bon objectif, de bonnes conditions et un observateur entraîné font mieux. Il suffit d'avoir en tête le tableau XII.3 et de comparer ses observations aux valeurs données par les catalogues. La situation est idéale pour des couples équilibrés ; une adaptation se justifie en cas de dissymétrie. Le cas le plus délicat se présente lorsque la composante est proche de l'anneau ou sur celui-ci, c'est-à-dire, pour un écartement en secondes d'arc de $18,5/D(\text{cm})$ (pour le second anneau, c'est $30/D$). Voilà encore une situation où la séparation peut être appréciée avec une grande précision.

Pour des couples peu lumineux, il faut rappeler que la capacité de séparation chute avec la diminution de la luminosité. Peterson a publié un diagramme séparation-magnitude (Sky and Telescope, sept. 1954) effectué sur une centaine de couples divers avec une lunette de 75 mm et un grossissement de 45. Un tel travail apporterait plus sur notre sujet s'il était refait avec un instrument de 100 à 150 mm et un grossissement de 2D.

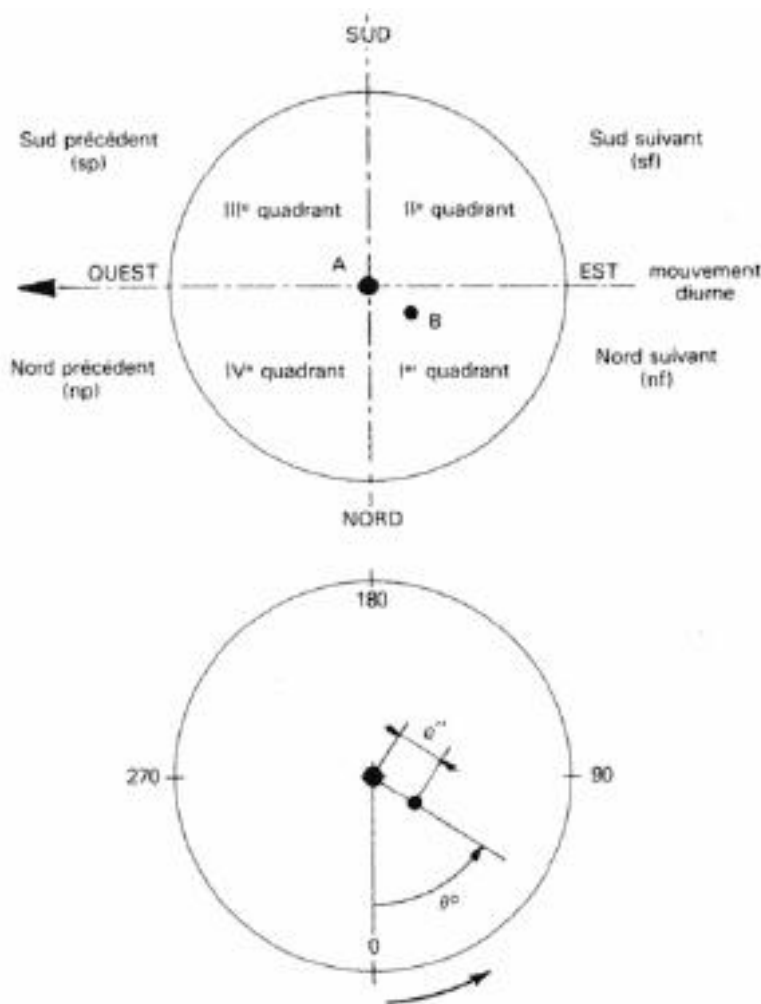


Figure XII.5 - Repérage à l'oculaire d'un couple stellaire par rapport au mouvement diurne et principe des mesures micrométriques en coordonnées polaires. Ici, le compagnon (ou la composante B) est dans le 1er quadrant (au Nord suivant) ; $s\phi\tau \Sigma\alpha\nu\sigma \varepsilon\rho\phi$ fait 58° , sa séparation ρ serait lue sur le micromètre.

2.4 - SE METTRE LE COMPAS DANS L'OEIL

Les promenades de curiosité dans le monde céleste des doubles et multiples permet d'habituer l'oeil à évaluer des séparations plus importantes : 5", 10", 20", les valeurs rondes étant intéressantes. Rien n'empêche par la suite de tenter l'estimation des doubles rencontrées, de noter ces valeurs, et de les vérifier après coup dans les catalogues, à condition, bien sûr, de procéder toujours avec le même instrument et surtout le même grossissement. C'est une excellente éducation de l'oeil à entreprendre qui pourra s'investir ultérieurement ailleurs que pour les doubles, lorsque l'on voudra se livrer à des observations utiles. Savoir ce que 10" représentent dans le champ d'un oculaire semble un préalable à toute prise de dessins (voir tableaux XII.4F, XII.4G, XII.4H).

2.5 - PRENDRE LE RELAIS DES MESURES

Depuis deux siècles, l'on mesure des étoiles doubles. C'est beaucoup : bel exemple de continuité d'observations scientifiques. Mais c'est peu pour déterminer des orbites qui ont une période de plusieurs centaines d'années, voire d'un millénaire. Des générations d'observateurs d'étoiles doubles ont déjà apporté leurs mesures pour que la continuité soit assurée. C'est à la nôtre de prendre le relais pour qu'il n'y ait pas de coupure. Il y a d'autant plus de travail que nous avons en outre la charge de suivre celles qui ont été découvertes récemment.

Jusque dans les années 1950, beaucoup d'observateurs, amateurs ou professionnels effectuaient encore des mesures. Depuis, leur nombre s'est peu à peu réduit justement au moment où il en aurait fallu plus.

Traditionnellement, les amateurs ont toujours tenu une grande place dans cette discipline. Il faut rappeler les noms de Dembowski, Espin, Jonckheere, Baize, Duruy. Traditionnellement aussi, les Français ont toujours bien marqué leur présence. Il faut donc espérer que ces traditions se maintiennent. C'est la tâche que s'est fixée la Commission des Etoiles Doubles de la Société Astronomique de France. Mais ses ressources humaines sont encore insuffisantes ; il lui faut doubler ou tripler son potentiel d'observateurs pour assurer toutes les réobservations nécessaires.

2.6 - L'ÉDUCATION DE L'OEIL

Régulièrement, l'amateur qui débute dans l'observation des binaires est déçu de ne pas distinguer le couple qu'on lui montre. Il ne faut pourtant pas se décourager. L'oeil est un instrument d'une souplesse incroyable, s'adaptant à des différences importantes d'éclairage de l'ordre du million de fois. Travaillant vite, il peut suivre des mouvements rapides de faible amplitude à l'oculaire. Mieux, comme il est relié au meilleur ordinateur analysant l'information reçue en temps réel, il s'adapte, s'éduque, à condition de le maintenir en bon état. Il faut aussi l'entraîner régulièrement pour entretenir ses capacités.

A ces conditions, l'éducation peut s'effectuer en quelques semaines. Un de nos amis, examinant pendant ses vacances les doubles de la petite constellation Equ, est arrivé à distinguer les composantes d' ϵ Equ (1") après plusieurs observations séparées de quelques jours, à l'aide d'un T115. D'autres n'y sont pas arrivés avec un T200 la première fois. Mais la rançon de ceci est que l'oeil peut subir les influences du cerveau et avoir l'impression de voir. L'existence d'images fantômes est parfois due à la suggestion inconsciente, allant même jusqu'à fausser des mesures. Méfiance donc ! Il vaut mieux reprendre plusieurs soirs de suite une observation dont on n'est pas sûr. Méfiance aussi envers les appareils mal collimatés ou à l'optique imparfaite. Le test est la vision d'un compagnon sur toutes les étoiles et dans le même angle.

3 - LES CATALOGUES

Le choix de programmes d'observation, qu'ils soient conçus pour satisfaire la curiosité ou faits en vue de mesures, se déterminent toujours à partir de catalogues d'étoiles doubles. Ceux-ci sont nombreux. Si on trouve très difficilement des catalogues de professionnels, il est plus facile d'en acquérir d'autres plus spécifiques découlant des premiers : couples orbitaux, couples pour amateurs, couples spectaculaires...

Actuellement, le plus ancien encore négociable avec de la chance est l'A.D.S. (New General Catalogue of Double Stars) de Aitken et Doolittle, sorti en 1932 (deux tomes). Pour 17 180 objets jusqu'à la déclinaison -30° , il donne le détail, souvent la moyenne des mesures effectuées sur un couple depuis sa découverte. Il est utile pour le calculateur d'orbites qui veut reconstituer le mouvement du compagnon.

Bien qu'il soit difficilement trouvable (mais il existe en microfiches au Centre de Données Stellaires de Strasbourg), on doit penser ensuite à l'I.D.S. (Index Double Stars, 1961,0) : deux tomes publiés en 1963 par Jeffers et Van den Bos (Lick Observa-tory). Celui-ci rassemble 64 250 objets sur tout le ciel mais ne donne qu'une mesure, deux si un mouvement est évident. Il comporte des erreurs, malheureusement, et recense de nombreux couples photographiques imprécis. Une version numérique mise à jour existe depuis les années 1990 : le WDS.

Ajoutons le Catalogue d'Ephémérides d'Etoiles Doubles de Muller et Couteau, publié par l'observatoire de Paris, en 1979, puis de Nice, en 1986. Il est valable jusqu'en 1989. Il contient des indications sur 886 orbitales et leur éphéméride. Un catalogue de ce type, plus récent, existe à l'USNO (Washington).

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	$m_1 - m_2$	θ pour 1987	ρ	Notes
α Cas H 18	561AD	00h40,5 N55°91	2,5–8,5	280°	64,4"	optique, s'écarte progressivement.
ψ Pis STF 88	899AB	01 h05,6 N21 °28	5,6–5,8	159°	30,0"	
λ Ari H 12	1563AB	01h58,1 N23°35	4,9–7,7	46°	37,4"	déjà difficile.
θ_2 Ori STF 16 Ap1	4188AB	05h35,4 S05°25	5,2–6,5	92°	52,5"	système triple :difficile dans la nébuleuse.
ι Cnc STF 1268	6988	08h46,7 N28°46	4,2–6,6	307°	30,5"	Probablement optique.
ν Dra STF 35 Ap1	10628	17h32,2 N55°11	5,0–5,0	312°	61,9"	optique.
ζ Lyr STF 38 Ap1	11639AD	18h44,7 N37°36	4,3–5,9	150°	43,7"	
β Cyg 12540 STF 43 Ap1		19h30,7 N27°58	3,2–5,4	54°	34,4"	Contraste coloré.
61 Cyg STF 2758	14636AB	21h06,3 N38°39	5,6–6,3	147°	29,5"	orbitale.148°-29,7"en 1990, 150°-30,3" en 2000.
δ Cep STF 58 Ap1	15987AC	22h29,2 N58°25	3,8–7,5 à 4,6	191°	41,0"	

Tableau XII.4A - 10 doubles écartées pour jumelles (observer bien installé, instrument fixe).

Ces trois ouvrages se trouvent dans la plupart des observatoires et à la Société Astronomique de France.

Les autres catalogues découlent des précédents. Les plus importants sont :

le Catalogue de 2 500 étoiles doubles de J. Minois (S.A.F.), classées par constellation, donnant l'éphéméride des orbitales ;

le Sky Catalogue 2000, vol. II, qui contient entre autres plus de 11000 couples, en général issus de l'A.D.S., suivis de 532 orbites de binaires et autant de binaires spectroscopiques.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	m ₁ - m ₂	θ ρ pour 1987	Notes
α Pis STF 202	1615	02h02,0 N02°46	4,2-5,2	275° 1,6"	orbitale. 268°-1,5" en 1995.
τ Oph STF 2262	11005AB	18h03,0 S08°11	5,2-5,9	279° 1,8"	orbitale. 281°-1,7" en 1995.
ε1 Lyr STF 2382	11635AB	18h44,3 N39°40	5,1 - 6,1	353° 2,6"	orbitale. 352°-2,6" en 1995.
ε2 Lyr STF 2383	11635CD	- -	5,1 - 5,4	88° 2,3"	orbitale. 78°-2,4" en 1995.
2 Equ STF 2742	14556	21h02,2 N07°11	7,4-7,4	218° 2,8"	un peu faible pour 60 mm.
ζ Aqr STF 2909	15971AB	22h28,8 S00°02	4,3-4,5	208° 1,8"	orbitale. 199°-2,0" en 1995.

Tableau XII.4B - 6 doubles pour une lunette de 60 à 70 mm.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	m ₁ - m ₂	θ ρ pour 1987	Notes
STF 228	1709	02h14,1 N47°29	6,6-7,1	272° 1,1"	orbitale. 275°-1,1" en 1995.
52 Ori STF 795	4390	05h48,0 N06°27	6,0-6,1	211° 1,4"	se resserre lentement.
57 Cnc STF 1291	7071	08h54,2 N30°34	6,1 - 6,6	315° 1,5"	compagnon C de 9e à 55".
η CrB STF 1937	9617AB	15h23,2 N30°18	5,6-5,9	18° 0,9"	orbitale. P=41a. 42°-1" en 1995, 64°-0,8" en 2000.
ε Equ STF 2737	14499	20h59,1 N04°18	5,8-6,3	285° 1,0"	orbitale. 284°-0,9" en 1995 comp. C de 7° à 10,5".

Tableau XII.4C - 5 doubles pour une lunette de 100 ou un télescope de 110 mm.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	m ₁ - m ₂	θ ρ pour 1987	Notes
66 Psc STT 20	746AB	00h54,6 N19°12	6,2-6,9	215° 0,49"	orbitale. P=360a. 205°-0,51" en 1995.
γ And STT 38	1630BC	02h03,5 N42°23	5,5-6,3	106° 0,56"	A-BC est γ And : 9,8" orb. : 105°-0,52" en 1995.
STT 235	8197	11h32,4 N61°05	5,8-7,1	270° 0,57"	orb. P=71a. 315°-0,61" en 1995 4°-0,7" en 2005.
- STF 2315	11334	18h25,0 N27°23	6,5-7,5	127° 0,72"	orb. P=775a. 125°-0,76" en 1995.
52 Peg STT 483	16428	22h59,2 N11°44	6,1 - 7,4	311° 0,67"	orbitale. P=286a. 323°-0,67" en 1995.

Tableau XII.4D - 5 doubles pour un télescope de 200 mm.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	m - m ₂	θ ρ pour 1987	Notes
BU 4	1097AB	01h21,3 N11°32	7,4-8,0	109° 0,43"	orb. P=180a. 105°-0,45" en 1995.
- STF 511	3098	04h17,9 N58°47	7,5 - 7,9	95° 0,39"	orb. P = 254a. 83°-0,38" en 1995.
- STT 298	9716AB	15h36,1 N39°48	7,4-7,6	257° 0,32"	orb. P=55a. 272°-0,29" en 1988 28°-0,26" en 1995 171°-0,8" en 2005.
73 Oph STF 2281	11111AB	18h09,5 N04°01	6,1-7,0	309° 0,40"	orb. P=270x. 285°-0,45" en 1995.
72 Peg BU 720	16836	23h34,0 N31°20	6,0 - 6,0	87° 0,53"	orb. P = 240a. 93°-0,51" en 1995,

Tableau XII.4E - 5 doubles pour un télescope de 300 mm.

Mais, pour démarrer, le plus pratique est sans doute celui de « la Revue des Constellations » (S.A.F.) qui présente, descriptions à l'appui réalisées avec des instruments de toutes dimensions, 534 doubles ou multiples classées par constellations ; les données pour les orbitales ont été actualisées dans la dernière édition, en fin de volume.

De nombreux catalogues de quelques pages figurent dans tous les livres et manuels traitant de la pratique de l'astronomie et de cette question en particulier. Il faut citer essentiellement le livre du spécialiste Paul Coureau : « L'observation des étoiles doubles visuelles » dans lequel on trouve une liste de pas moins de 744 objets classés par ascension droite, incluant des couples serrés jusqu'à 0,2", permettant donc ainsi de tester les limites des plus grands instruments d'amateur.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	m ₁ - m ₂	θ ρ pour 1987	Notes
STF 48	582	00h42,6 N71°21	8,0-8,2	334° 5,4"	comp. C à 55" de 7 ^e .
STF 958	5436	06h48,3 N55°43	6,3-6,3	257° 4,8"	
ζ Cnc STF 1196	6650BC	08h12,2 N17°40	5,0-6,3	78° 5,9"	primaire double : 0,6".
η Boo STF 1864	9338	14h40,7 N16°26	4,9-5,8	110° 5,5"	
α Her STF 2140	10418AB	17h14,6 N14°23	3,5-5,4	106° 4,6"	primaire variable

Tableau XII.4F - 5 doubles à environ 5" de séparation.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	m ₁ - m ₂	θ ρ pour 1987	Notes
γ And STF 205	1630A-BC	02h03,5 N42°23	2,2-5,1	63° 9,8"	déjà cité pour BC.
1 Cam STF 550	3274	04h32,0 N53°55	5,7-6,8	308° 10,3"	
STF 1245	6886AB	08h35,8 N06°37	6,0-7,0	26° 10,2"	
STF 1904	9493	15h04,2 N05°30	7,0-7,0	347° 10,1"	
γ Del STF 2727	14279	20h46,7 N16°08	4,3-5,2	267° 9,6"	En 1991,5 : 267 ; 9,4" (HIP)

Tableau XII.4G - 5 doubles à environ 10" de séparation.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	$m_1 - m_2$	θ pour, 1987	ρ	Notes
χ Tau STF 528	3161	04h22,6 N25°38'	5,5—7,6	24°	19,4"	
24 Com STF 1657	8600	12h35,1 N18°23'	5,2 — 6,8	271°	20,2"	
α CVn STF 1962	8706	12h56,1 N38°18'	2,9—5,5	229°	19,5"	double bien connue
61 Oph STF 2202	10750AB	17h44,6 N02°35'	6,2—6,6	93°	20,6"	
8 Lac STF 2922	16095AB	22h35,8 N39°38'	5,8—6,6	186°	22,3"	5 composantes dans le système.

Tableau XII.4H - 5 doubles à environ 20" de séparation.

Signalons, avant de clore cette partie, la mise sur pied par Jean Dommanget d'Uccle d'un nouveau catalogue, précis, saisissable par informatique. Partant de l'Index revérifié, nettoyé et enrichi, il décrit non plus des ensembles, mais attribue à chaque ligne une composante, d'où sa dénomination : «Catalogue des composantes de systèmes doubles et multiples» (C.C.D.M.). Malheureusement, il faut craindre qu'il ne soit jamais diffusé sur un support papier.

Les catalogues proposés et celui du tableau XII.4 en particulier contiennent en général les rubriques suivantes classées par colonne. D'abord, la désignation de l'étoile par son nom si elle est brillante, le sigle de son découvreur suivi du numéro qu'il lui a donné : H pour Herschel, STF ou Σ pour F.W. Struve, STT ou 0Σ pour son fils Otto, A pour Aitken, Cou pour Couteau, Mul pour Muller... Parfois, on donne le numéro du catalogue A.D.S. Ensuite, on indique la position de l'objet en coordonnées équatoriales α et δ en précisant l'équinoxe de référence : 1900, 1950 ou 2000, au dixième de minute en α et à la minute de degré en δ , ce qui est suffisant pour l'identifier visuellement à l'oculaire. Viennent après, les magnitudes visuelles m_1 et m_2 des composantes, et enfin la position relative du compagnon par rapport à la principale en coordonnées polaires, le Nord étant l'origine de l'angle θ en degrés, ρ étant la séparation en secondes d'arc. Parfois, des notes diverses s'ajoutent à la suite.

4 - LES TECHNIQUES DE MESURE : MÉTHODES VISUELLES

4.1 - CHOISIR UN INSTRUMENT ADAPTÉ

Mesurer des étoiles doubles est un travail d'astrométrie particulier. On utilise ici une longue focale pour obtenir une précision suffisante. Pour que l'image soit mesurable, elle doit être suffisamment grande par rapport au système de mesure choisi. Dans le plan focal, la longueur qui représente un angle de 1" vaut $F/206265$. Sur la figure X11.6, on observe qu'il faut plus de 2m de longueur focale pour que les incertitudes des mesures (environ 0,01 mm) soient de l'ordre de 1", ce qui n'est pas suffisant pour notre projet.

La solution est donc soit de disposer d'un instrument à grand rapport F/D faisant au moins 3m de longueur focale, soit d'amplifier la longueur focale primaire d'un grossissement $\gamma = 2,5$ à 3 à l'aide d'une Barlow dans le cas d'un télescope newtonien. Un rapport F/D de 15 à 20 représente une bonne valeur.

Un chercheur relativement puissant d'une ouverture voisine du quart de celle de l'instrument se justifie : par exemple 60 mm pour 210 mm, 76 mm pour 310 mm. Il doit permettre la vision des étoiles dont l'instrument révèle le faux disque et surtout permettre, grâce à un grossissement approprié, le pointage sans peine avec l'oculaire donnant le plus fort grossissement sur l'instrument.

Si tout instrument peut servir à s'initier par des promenades parmi les couples célestes, les contingences décrites plus haut et la nécessité d'une bonne définition font qu'un objectif de 100 mm est le minimum pour une véritable prise de mesures.

Si le jeune débutant qu'était Paul Baize dans les années 1930 ne trouvait pas compliqué d'effectuer des pointés avec une monture azimutale, il est plus rapide d'utiliser l'équatorial, beaucoup plus courant à notre époque. Celui-ci permet le suivi confortable de l'astre étudié, mais aussi le pointage en utilisant les coordonnées équatoriales. Cette pratique est très rapide si on ne voit pas l'étoile cherchée à l'oeil nu, soit

que l'on utilise la méthode différentielle (pointer une étoile bien visible et de position connue puis afficher la différence en ascension droite et en déclinaison), soit que l'on préfère utiliser le temps sidéral TS en appliquant $H = TS - \alpha$ où H est l'angle horaire à afficher sur les cercles, le passage au méridien donnant évidemment Oh.

Le suivi parfait n'est pas nécessaire puisqu'on a souvent besoin de déplacer l'objet dans le champ, mais les rappels doivent être précis. Il faut particulièrement veiller à la mise en station pour ne pas accumuler des erreurs d'angle de position à cause d'un pointage vers le Nord imparfait.

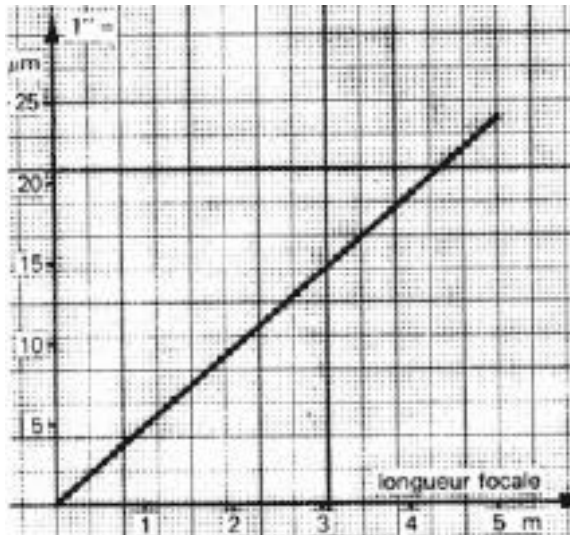


Figure XII.6 - Echelle au plan focal d'un instrument. Les ordonnées indiquent la dimension de l'image, exprimée en μm , qui représente un angle de 1".

Lunette ou télescope ? Cette question revient souvent. Par tradition, les observateurs d'étoiles doubles ont utilisé la lunette en Allemagne, en France, aux U.S.A., et ... le télescope en Angleterre surtout. Pour les instruments au-delà de 20 cm d'ouverture, nul doute que l'image d'une lunette sera de meilleure qualité : tube fermé, prise d'onde plus élevée, disque d'Airy plus fin à cause du spectre secondaire. Par contre, un télescope de 30 cm sera plus efficace et meilleur marché qu'une lunette de 20 cm. Il y a sans doute avantage à fermer le tube, mais on rencontre peu d'amateurs qui l'ont fait et ont procédé à des tests comparatifs ; la possibilité de fixer le miroir secondaire à la lame de fermeture, donc de supprimer par ce biais les aigrettes de diffraction causées par l'araignée, paraît un progrès important. Dans le cas d'étoiles brillantes, ces aigrettes provoquent le renforcement des anneaux et peuvent empêcher l'observation d'un compagnon proche de faible luminosité.

4.2 - UN ÉQUIPEMENT SIMPLE POUR COMMENCER LES MESURES

Outre leur utilité pour toute la communauté scientifique lorsqu'elles sont publiées, les mesures sur quelques années, quelques mois même dans certains cas, permettent de constater des changements dans l'aspect des couples en mouvement. C'est une façon de vivre un suspense - heureusement très soutenable - que de vérifier si le mouvement est conforme aux prévisions.

Pour cela, un rapporteur gradué et un oculaire réticulé sont suffisants. L'oculaire, un 6 mm ou un 8 mm donnant un grossissement de 2 à 2,5D, sera équipé d'un anneau accolé au diaphragme et placé pour être vu net, sur lequel on aura tendu un fil de nylon selon un diamètre. Une bonne manière de procéder est d'extraire un minuscule fil d'un brin de nylon ou de tergal. Collé préalablement sur un arc en carton qui le maintient tendu, on le fixe sur l'anneau en s'aidant d'une loupe, avec deux gouttes de colle rapide. Le rapporteur gradué est monté bien centré sur le porte-oculaire par le biais d'une bague permettant le blocage, assez loin pour éviter de le toucher avec le nez. Un index parallèle au fil est fixé sur l'oculaire. En fait, deux index à 180° lus simultanément combattent toute erreur de centrage. On peut éclairer le champ ou le fil à l'aide d'une petite diode alimentée par une pile 4,5V montée en série avec un potentiomètre variant entre 10 et 100 .

La mesure de l'angle θ s'opère par différence entre l'angle relevé pour le mouvement diurne, donnant le Nord en ajoutant ou retranchant 90°, et la direction de l'alignement des composantes (voir figure XII.7). En laissant défiler l'image, grâce à l'arrêt de l'entraînement, on tourne l'oculaire jusqu'à ce que l'étoile choisie proche de l'équateur coure bien sur le fil, d'un bord à l'autre.

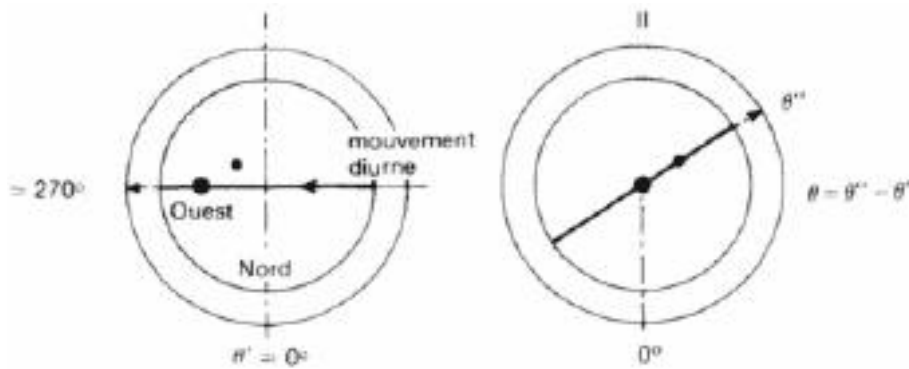


Figure XII.7 - Mesure de l'angle θ avec un réticule à un fil.

On peut aussi tourner ce dernier pour lui faire indiquer 270° (l'Ouest). Cette manipulation recommencée 3 ou 4 fois et la moyenne calculée, on disposera de la direction du Nord avec une bonne précision. Il ne faut plus toucher au rapporteur et pointer la double à étudier pour opérer quelques bisections ; ceci signifie que l'on oriente le fil pour qu'il passe par le centre des deux étoiles (on aura noté préalablement dans quel cadran se trouve le compagnon). Cette moyenne obtenue, diminuée de la précédente (la direction du Nord) donne l'angle θ , angle de position du couple.

Pour la mesure de la séparation, on utilisera la méthode des passages en arrêtant le moteur, en alignant le fil vers le Nord et en chronométrant la durée de passage, correspondant à l'écartement des deux étoiles, sur le fil. Cette durée varie avec la déclinaison, d'où le calcul de la séparation : $\rho'' = t \cdot 15 \cdot \cos \delta / \sin \theta$, où t est la durée du passage en secondes (à au moins 0,1s près), δ la déclinaison et θ la valeur relevée plus haut. Quatre ou cinq opérations donneront une valeur moyenne de p pas trop ridicule si l'astre possède une déclinaison un peu forte et si l'observateur a le même temps de réaction lorsqu'il voit passer chaque étoile sur le fil. Cette méthode peut donner une valeur à la demi-seconde d'arc près, parfois mieux.

Ce système devient imprécis lorsque θ approche 0° ou 180° . On peut alors incliner le fil à 45° par rapport à l'axe Nord-Sud, mais le calcul doit être modifié selon les explications de la figure XII.8.

Cette méthode des passages ne peut s'appliquer qu'à des couples écartés, au moins de $10''$, mais elle a le mérite d'aborder les observations quantitatives avec peu de moyens. Pour les couples au contact, c'est la figure de diffraction qui servira d'échelle (revoir le tableau XII.3).

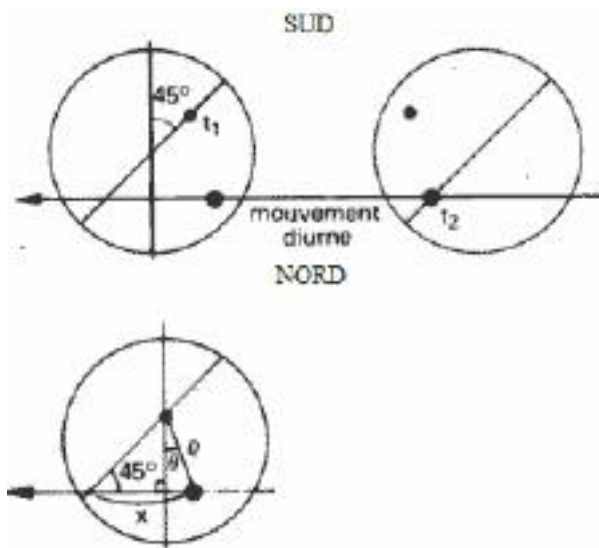


Figure XII.8 - Méthode de mesure des passages avec fil à 45° de l'axe Nord-Sud, lorsque θ est proche de 0° ou de 180° .

A : mesure de l'intervalle de temps $t = t_2 - t_1$, entre les deux coïncidences ; l'image s'est alors déplacée d'un angle x tel que :
 $x'' = 15 \cdot t(s) \cdot \cos \delta$

B : relation entre la valeur x mesurée et l'écartement des étoiles. On voit, sur le dessin ci-contre où le fil est orienté suivant la première bissectrice, que :

$x = \rho | \cos \theta + \sin \theta |$ Si le fil est orienté suivant la deuxième bissectrice (soit NE—SW), la relation devient : $x = \rho | \cos \theta - \sin \theta |$

On choisira l'orientation du fil qui donne le temps t le plus long.

4.3 - LE MICROMÈTRE TOURNANT

Le système décrit plus haut peut s'améliorer facilement en collant un second fil parallèle au premier et très près de lui. Pour que les deux fils soient bien parallèles, on les colle l'un contre l'autre puis on les écarte avec un petit bout de cheveu que l'on pousse et que l'on colle à chaque bord de l'anneau. Ce travail délicat s'exécute à l'aide d'une pince à épiler et d'une loupe compte-fil.

Pour les mesures de θ , cet appareil évite la bissection qui reste imprécise quand le fil masque les étoiles. Il faut alors placer les deux étoiles entre les fils et rechercher le parallélisme. En ce qui concerne ρ , on fait ensuite tourner le micromètre jusqu'à ce que chaque étoile soit bissectée par un fil (fig. XII.9). On relève l'angle θ' ou θ'' . La différence entre ces deux valeurs; i , permet de calculer ρ grâce à la connaissance de l'écartement e en secondes d'arc: des deux fils (à obtenir par étalonnage sur des couples d'écartement bien connu du tableau XII.5) $\rho = e/\sin i$.

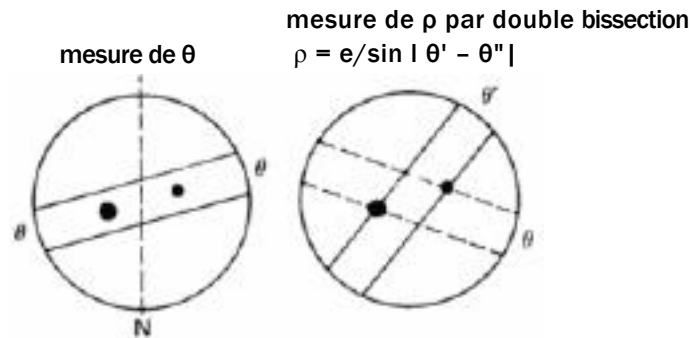


Figure XII.9 - Utilisation du micromètre tournant.

Quatre ou cinq pointés sont nécessaires encore pour obtenir une moyenne valable. Cette méthode est plus sensible que la précédente pour des séparations de 2" à 7" environ, si les fils sont écartés de 2" sur le ciel. Au-delà, on comprend que pour une petite incertitude sur l'angle, la répercussion sur ρ devient vite inacceptable, mais associée au premier système décrit, elle permet de couvrir tous les écartements possibles.

4.4 - LE MICROMÈTRE EN V

Là, les fils ne sont plus tendus mais tracés sur un support transparent, toujours monté dans l'oculaire. Le point le plus délicat consiste à photographier une mire sur un film à haute définition, genre Recordak 5786, traité dans du révélateur grain fin, de façon à laisser le support le plus transparent possible. La mire se constitue d'un V tracé sur quatre feuilles de Canson noir accolées, fixées sur un panneau. La trace du V est matérialisée par du fil bien blanc de 0,5 mm de section tendu par des épingles. Les branches de ce V forment un angle de 5,7° qui donne une démultiplication de 10 fois. Sur le panneau, il fait 48 cm de haut et 13,4 mm de large. Il est gradué de 1 à 10 et traversé par un fil perpendiculaire faisant office de graduation 5. Pour élargir ses possibilités, on ajoute un fil parallèle à l'un des côtés décalé de 13,4 mm. On peut utiliser le même procédé pour l'autre branche. Ce montage est photographié par exemple à 6,6m avec un objectif de 55 mm réglé sur 5, 6 ou 8 pour obtenir la meilleure définition. (Pour plus de précisions, voir l'Astronomie de septembre 1979).

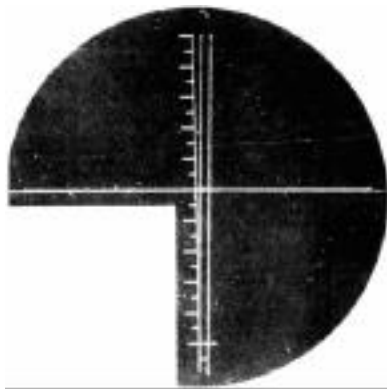


Figure XII.10 - Un micromètre en V. Tirage du négatif de la graduation. Echelles de 0 à 10" et de 10" à 20"

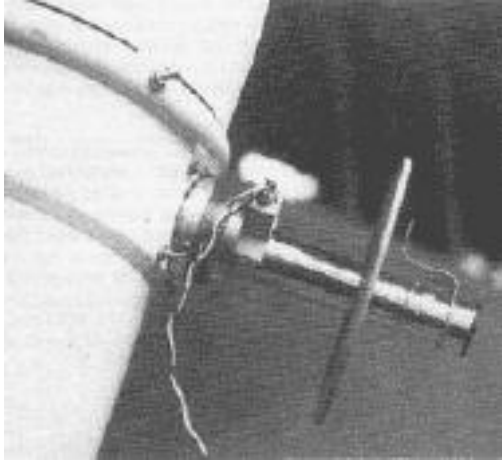


Figure XII.11 - Montage du micromètre en V sur un télescope, avec barlow, éclairage indirect sur le porte-oculaire, rapporteur solidaire de celui-ci et index fixé à l'oculaire

Un éclairage indirect placé soit dans le tube porte-oculaire, soit près de l'objectif, lié à un potentiomètre, est installé comme expliqué précédemment. On monte ce V près du plan focal de l'oculaire et on soigne la mise au point. On aura pris la précaution de découper un secteur libre dans un angle pour procéder à d'éventuelles vérifications, avant de le mettre en place.

L'angle de position se mesure à l'aide du trait transversal après détermination en début de nuit de la direction du mouvement diurne qui donne le Nord. La mesure des séparations s'effectue en recherchant la bissection à l'aide des deux branches du V, une fois en partant du 0, la seconde en partant du 10. On recommence une autre fois ce va-et-vient pour obtenir quatre valeurs dont on fait la moyenne. Avec une longueur focale de 3m, on dispose d'une échelle de 0,7" environ par division, ce qui permet une plage de mesures de 1" à 14" ; la quatrième branche conduisant jusqu'à 21", ce qui permet d'aborder la plupart des couples intéressants.

L'inconvénient est que le négatif éclairé, même bien transparent, absorbe de la lumière, faisant perdre environ 1 magnitude. La précision que l'on peut en attendre, de l'ordre du dixième de graduation, fait que l'incertitude est à peu près 0,1" ou 0,2" suivant la qualité de l'étalonnage du système (tableau xll.5).

4.5 - LE MICROMÈTRE A DIFFRACTION

Les phénomènes dus à la diffraction peuvent jouer un rôle comme élément étalon par interposition d'une grille faite d'une succession régulière de barres et de vides. Une étoile vue à l'oculaire à travers ce réseau placé devant l'objectif donne un système décroissant d'images satellites alignées sur un axe perpendiculaire aux barres (en réalité des petits spectres). L'écartement angulaire image-premier satellite fait $\alpha(") = 206265\lambda/P$ où λ est la longueur d'onde du maximum visuel (0,56 μm) et P le pas de la grille (un barreau + un vide). Par exemple, pour $P=10\text{mm}$ (barres de 5 mm), $\alpha = 11,6"$ (ce qui est l'ordre des grandeurs à mesurer).

Une construction rapide consiste à coller jointivement sur un cadre des bandes magnétiques robustes, de cassette (3,8 mm) ou de bobine (6 mm) et d'en enlever ensuite une sur deux. On installe cette grille sur un support gradué en 360° dans lequel elle pourra tourner et on monte le tout en bout de tube devant l'objectif, la grille étant bien sûr d'une dimension un peu supérieure à celui-ci.

Un oculaire assez fort, réticulé comme décrit au paragraphe 4.2, est nécessaire, muni d'un index avec un rapporteur 360° sur le porte-oculaire. En tournant la grille, on peut réaliser des figures remarquables (triangles, rectangles) qu'il suffit de résoudre ; mais il y a plus rapide.

Le mouvement diurne, donc le Nord, ayant été déterminé à l'aide du réticule, il reste à faire tourner la grille pour obtenir un triangle bien équilibré avec la double A,B et un satellite A' de la principale comme sommets. Le réticule et son index vont permettre de relever la- valeur des angles θ , θ_1 , θ_2 tels qu'ils sont définis sur la figure XII.13. Alors, $AB = AA' \cdot \sin |\theta_1 - \theta| / \sin |\theta_2 - \theta|$. AA' correspond à l'étalonnage de la grille en secondes d'arc. Quelques mesures donneront une moyenne de θ et de ρ .

Figure XII.12 - Grille de diffraction montée sur un télescope.

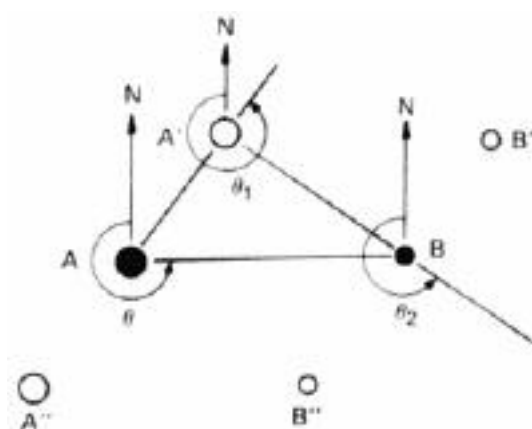


Figure XII.13 - Mesure des angles (avec le réticule monté dans l'oculaire) pour un micromètre à diffraction (A', A'', B', B'' sont les images satellites).

L'ennui de ce système est qu'il nécessite deux à trois grilles de pas croissant pour atteindre toutes les séparations entre 1" et 30" et qu'il prélève beaucoup de lumière (perte de 1,5 mag pour l'image principale). Il se limite donc aux couples brillants et à faible m , à moins que l'on utilise des télescopes de 35 ou 40 cm d'ouverture.

Une amélioration possible revient à remplacer les barres par des fils de cuivre ou de nylon de 1 mm à 2 mm de diamètre, mais alors le premier satellite devient moins lumineux (voir Observations et Travaux n° 4, Société Astronomique de France). On peut encore enlever quelques barres au centre et sur les bords pour obtenir le même résultat (Sky and Telescope, juin 1980).

La précision de l'ensemble sur les séparations varie avec la difficulté de l'observation. Là encore, elle est de l'ordre de 0,1" pour un observateur entraîné. Pour plus de détails, voir l'article de J. Minois, l'Astronomie, mai 1984.

4.6 - LE MICROMÈTRE À FILS

C'est l'appareil le plus utilisé depuis W. Struve. Il a l'avantage de laisser le faisceau lumineux libre, donc de permettre l'observation de l'image dans toute la pureté que donne l'objectif. Des modèles de cet appareil sont construits en Grande-Bretagne et aux U.S.A., mais leur prix est élevé et ils risquent de ne pas satisfaire l'observateur. En France, la firme Micro Contrôle fabrique des instruments voisins. Aux USA : Ron Darbinian, 1681 12th street Los Osos 93402 USA.

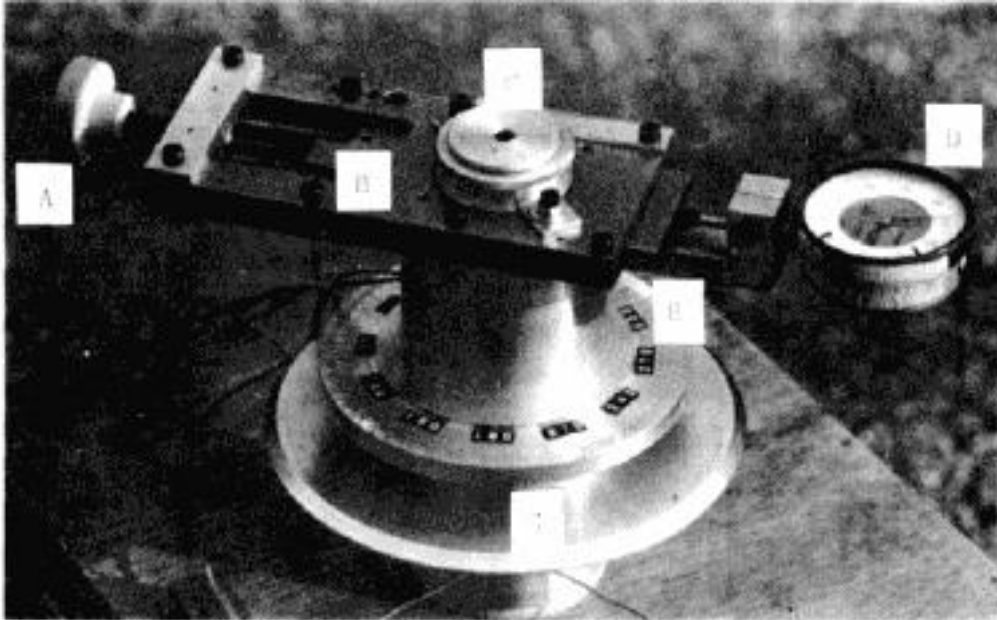


Figure XII.14 - Micromètre à fils construit par J.L. Agati.
 A : vis de commande de la translation du cadre mobile ; B : chariot coulissant avec ressorts de rappels ; C : oculaire ; D : comparateur (mesure des déplacements du fil mobile) ; E : rapporteur 360° ; F : cadre fixe ; G : platine permettant la rotation de l'ensemble cadre-rapporteur.

On peut envisager sa construction avec l'aide de professionnels de la mécanique comme plusieurs amateurs l'ont fait en France (voir figure XII.14) ou aux U.S.A. (voir *Sky and Telescope*, avril 1985, ou *Amateur Telescope Making*). L'ouvrage de référence est encore *Lunettes et Télescope* de Danjon et Couder pour les conseils de base que nous redonnons ici.

Il doit être léger et peu encombrant. Un déplacement du fil mobile de quelques millimètres au foyer, grâce à un chariot (cadre mobile), est suffisant. Ce chariot doit se mouvoir dans un plan bien perpendiculaire à l'axe optique, ce qui suppose qu'il glisse sur une génératrice parfaitement plane nécessitant un ajustage en queue d'aronde. Le déplacement doit être commandé par une vis au pas de 0,5 pour être suffisamment sensible. Si l'on ajoute à cette vis la fonction mesure grâce à un élément de Palmer, la butée doit se faire par l'intermédiaire d'une petite bille. Des ressorts de rappel maintiennent le chariot contre le plan générateur et contre la vis. Plus simplement, on peut monter face à la vis un comparateur de bonne qualité assurant au moins 0,01 mm de précision à la lecture.

Les fils peuvent se réduire à deux : un fixe, collé sur le bâti, un mobile collé sur le chariot. Ces deux fils doivent être quasiment dans le même plan et se frôler en passant l'un sous l'autre. On peut les coller à la cire d'abeille ; le réglage se fera avec une loupe compte-fil et une tige métallique chauffée. On poussera doucement la cire pour positionner précisément ces fils. Leur provenance traditionnelle est le cocon d'araignée mais on peut trouver aussi des fibres artificielles de 5 à 7 gm de section auprès d'établissements travaillant dans le textile. Un éclairage latéral est assuré par une diode jaune réglée par un potentiomètre.

La monture des oculaires doit être adaptée. Dans le cas des Plössl ou des orthoscopiques, elle doit être raccourcie pour que l'optique soit suffisamment proche des fils de façon à ce qu'ils soient vus nets dans l'oculaire, ce qui suppose d'éliminer le diaphragme mais aussi de réduire le cercle oculaire : un œil qui ne reste pas centré entraîne des causes d'erreur (parallaxe). Il semble difficile de monter des oculaires à la focale plus courte que 8 mm ;

Le premier réglage consiste à vérifier la mise au point de l'oculaire sur les fils en l'amenant à bonne distance. Ensuite, un déplacement longitudinal de l'ensemble réalise la mise au point sur l'étoile dont l'image doit être alors dans le plan des fils. On peut s'en assurer en hochant la tête : on ne doit pas percevoir de déplacement de cette image par rapport aux fils.

A l'instar des pesées avec la balance, on pratique la double mesure avec le micromètre à fil comme il est décrit figure XII.15. Cette pratique a l'avantage de ne faire intervenir qu'une fois les jeux pour deux distances : une série de bissections étant faites en vissant, une autre en dévissant. Quatre pointés (ou six

en cas d'incertitude) donnent la moyenne à 0,001 mm près de ce qu'on appelle une mesure de la séparation. Cette moyenne est à multiplier par le « pas de la vis », échelle obtenue après étalonnage (voir paragraphe 6.5).

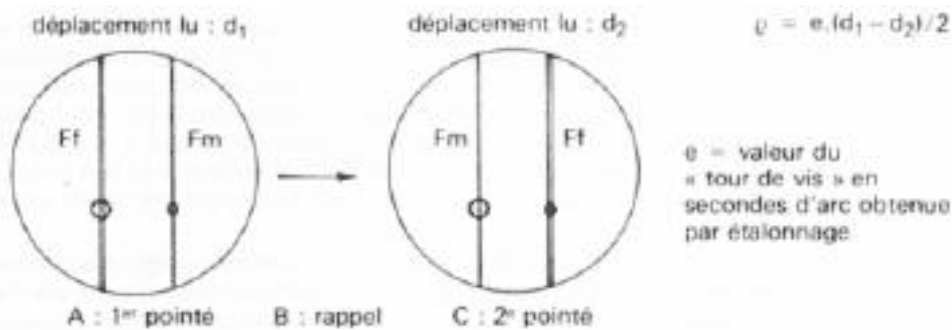


Figure XII.15 - Technique de la double mesure au micromètre à fil. Ff : fil fixe ; Fm : fil mobile.

L'angle de position se mesure comme décrit plus haut à l'aide des deux fils que l'on rapproche plus ou moins de chaque côté du couple. L'angle est lu sur le rapporteur fixé à une platine par rapport à laquelle le corps du micromètre, qui porte l'index, est mobile. La moyenne des quatre ou cinq pointés se calcule à 0,1° près. On répète ceci trois ou quatre nuits de suite pour en extraire une moyenne générale.

Les mesures filaires doivent toujours s'exécuter la ligne des yeux parallèle à la ligne formée par les deux étoiles. C'est ainsi que l'oeil est le plus sensible, mais les positions exigées sont parfois difficiles à tenir. C'est pour cela qu'une mesure ne doit pas trop durer, sinon la fatigue détruit la précision des résultats qui est de 0,1" environ (pour des séparations de 1 à 20"), parfois bien moins si l'observateur est entraîné et dispose d'un matériel de qualité.

4.7 - LE MICROMÈTRE A ÉTOILES DE COMPARAISON

Une étoile double assez lumineuse que l'on observe les deux yeux ouverts se projette sur le tube de l'instrument. On imagine alors une graduation fixée ainsi en retrait qui pourrait servir d'échelle aux mesures, un peu à la manière des chambres claires permettant le dessin au microscope. L'échelle ne dépend ici que du grossissement. Sur ce principe, V. Duruy (auteur aussi du micromètre à diffraction) avait imaginé en 1930 un dispositif binoculaire. Dans cet appareil, l'échelle est donnée par deux points lumineux d'écartement variable : deux fentes en V coulissant derrière une autre fente perpendiculaire, éclairées par dessous (fig. XII.16).

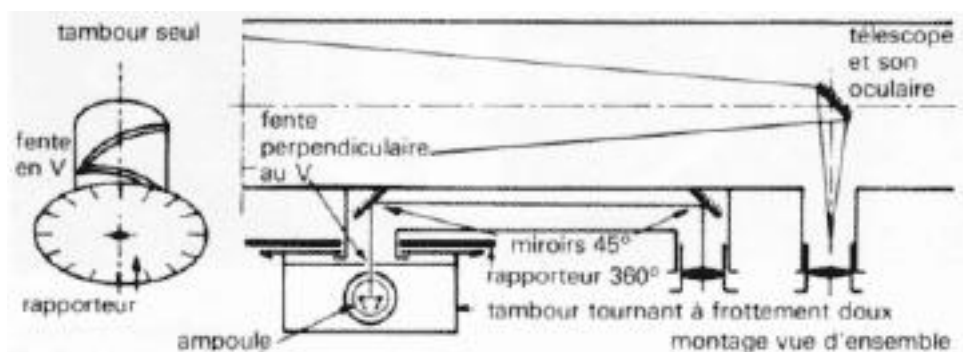


Figure XII.16 - Principe du micromètre à comparaison binoculaire.

Le problème ici est que l'effet physiologique dû à l'accommodation différentielle risque d'introduire une variable non maîtrisable, perturbant les mesures. Par contre, le faisceau reste complètement libre et l'éclairage du champ est inutile. A essayer...

En 1931, Davidson et Symms avaient réalisé un montage un peu plus sophistiqué, imaginé auparavant par Hargreaves. Un prisme de Wollaston provoque la formation de deux images d'un écartement proportionnel à la distance source-prisme. Deux Nicols permettent la variation de brillance de chaque faisceau. Un miroir à 45° au centre du tube de l'instrument renvoie l'image vers l'oculaire, si bien que l'observateur dispose des deux images de comparaison ajustables dans le même champ que la double à mesurer.

4.8 - LES MICROMÈTRES A DOUBLE IMAGE

D'après l'héliomètre, un amateur, Silva, proposa en 1935 un système voisin : une lentille de Barlow sciée selon un diamètre dont une moitié est fixe et l'autre mobile grâce à un chariot poussé par une vis. L'appareil donne deux images d'une étoile, dont la séparation est proportionnelle au déplacement, comme pour le micromètre à fil. Dans le cas des étoiles doubles, on dispose les images de façon à créer des figures remarquables pour lesquelles l'oeil montre une bonne sensibilité : alignements avec espacements réguliers, carrés, losanges, grâce à la possibilité de faire tourner les images en tournant la monture.

Le système le plus performant a été inventé par Paul Muller en 1937 et largement employé par la suite. Il utilise deux prismes en quartz (biréfringent), accolés par leur hypoténuse (axes cristallographiques perpendiculaires). L'ensemble translate perpendiculairement à l'axe optique, ce qui a pour effet de dédoubler plus ou moins les images. Le prisme est monté dans le cadre mobile d'un micromètre à fil. L'écartement de l'image étant sensible au moindre déplacement, tout se passe comme si le système amplifiait les translations. C'est donc un appareil plus sensible que le micromètre à fil. (Voir la Revue d'Optique T18 - 1939, et l'Astronomie, oct.-nov. 1972).

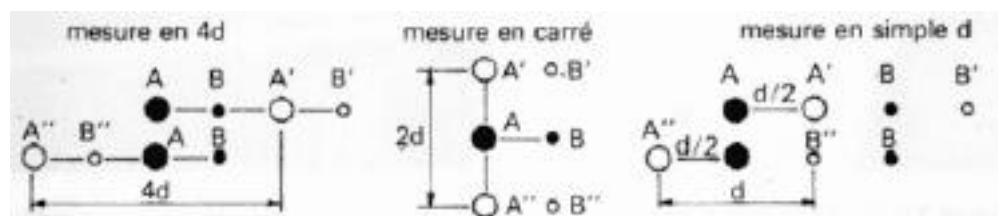


Figure XII.17 - Mesure des séparations en double image. Positions remarquables. En haut : 1^{er} pointé ; en bas, le second.

La figure XII.17 décrit les diverses possibilités de mesurer la séparation du couple. A chaque instant, l'observateur voit quatre points lumineux : les étoiles A et B du couple, et leur deuxième image, notée A' et B' sur la figure. Dans la méthode 4d, on place les images AB et A'B' de façon à ce que les quatre points lumineux soient alignés et équidistants (premier pointé) ; on note alors la position du chariot. On déplace ensuite le chariot de façon à ce que les images AB et A'B' soient permutées, mais toujours avec les étoiles équidistantes (deuxième pointé). Le déplacement de la deuxième image par rapport à la première est alors égal à quatre fois la séparation du couple (4d), et il est connu par simple lecture du déplacement du chariot que l'on aura préalablement étalonné. Si l'on dispose les images de façon à ce que les quatre points lumineux forment un carré, le déplacement du chariot lors de l'inversion de la figure correspond à deux fois la séparation (2d). On peut également aligner les étoiles de façon à ce que A' vienne s'intercaler au milieu du segment AB ; A, A', B et B' sont alors équidistantes, mais l'inversion de la figure (c'est A qui vient alors entre A' et B') correspond à un déplacement égal à la séparation du couple.



Figure XII.18 - Mesure de θ en double image. A gauche, alignement non réalisé ; à droite, alignement réalisé. Plus B et A' sont proches, plus cette technique est sensible.

On mesure les angles de position (fig. XII.18) avec une bonne précision en alignant les images après que l'axe de dédoublement ait été déterminé sur le rapporteur des angles de position. La méthode est très sensible pour les couples serrés.

On utilise la technique de la mesure en 4d pour les couples juste séparés et jusqu'à quelques secondes d'arc de séparation. Pour un écart plus grand, on choisit le 2d ou le carré ; au-delà, l'alignement en 1d. On comprend qu'un tel système soit particulièrement sensible et précis pour les courtes distances : en 4d, l'incertitude est divisée par 4 : elle n'est que de quelques centièmes de seconde d'arc. Encore faut-il que l'appareil soit corrigé de l'effet micrométrique à l'aide d'un autre prisme plus petit placé près de l'oculaire, oculaire constitué d'un petit microscope pour pouvoir accéder au plan image à l'intérieur du prisme !

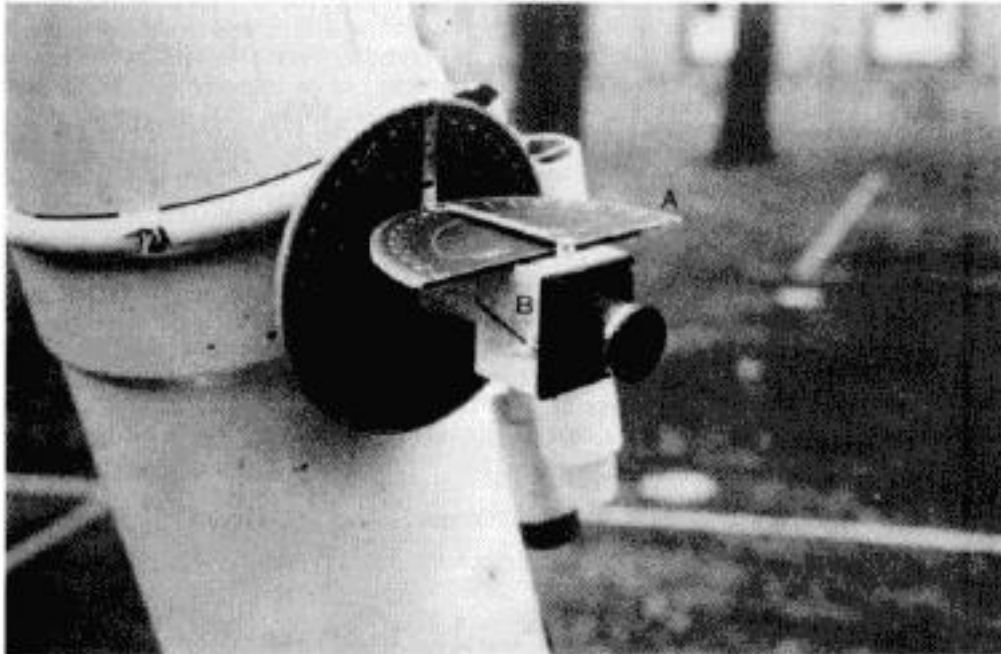


Figure XII.19 - Micromètre à lame de spath, réalisation d'amateur, monté sur un télescope. A : rapporteur mesurant les inclinaisons de la lame ; B : boîte contenant la lame pivotante ; C : porte-oculaire contenant une lentille de Barlow x2,5.

Une variante a été imaginée par Bernard Lyot et Henri Camichel en 1949, à partir d'une lame de spath polie parallèlement à l'axe cristallographique. La rotation de la lame provoque une variation de l'écartement des images due à la biréfringence. La lame a une épaisseur e , i est son inclinaison, n_e et n_o les indices extraordinaires et ordinaires. La séparation d_i des deux images se calcule avec :

$$d_i = e \sqrt{2} \sin 2i \left(\frac{1}{\sqrt{2n_e^2 - 1 + \cos 2i}} - \frac{1}{\sqrt{2n_o^2 - 1 + \cos 2i}} \right)$$

avec $n_e = 1,4864$ et $n_o = 1,6583$ pour la raie d du sodium.

Ici, le montage mécanique est particulièrement simple. Il suffit d'assurer une rotation sans jeu de la lame et bien perpendiculairement à l'axe optique de l'instrument, de lire les inclinaisons de la lame à $0,2^\circ$ près et de les transformer à l'aide d'une table en séparation (secondes d'arc) si l'on connaît bien la longueur focale de la lunette ou du télescope utilisé.

La Commission des Etoiles Doubles de la S.A.F. étudie la réalisation d'une petite série de cet appareil, en vue de le diffuser, car il est particulièrement sensible, même si sa plage de mesure reste réduite : 6" à 7" avec 3,5m de longueur focale environ. La présence d'une double image se paie par la perte d'une magnitude approximativement (0,75mag pour la division par 2 de l'éclairement, plus deux réflexions), d'où une certaine limitation dans le domaine des couples faibles. Le constructeur est : Ets Mériaudeau à Châtillon sur Indre (36).

4.9 - LE PHOTOMETRE A DOUBLE IMAGE

Un des avantages des deux derniers micromètres cités réside dans l'utilisation du phénomène de biréfringence, permettant d'étendre leurs possibilités vers la photométrie. Les deux faisceaux émergents sont polarisés à 90° . Un filtre polaroid installé à la sortie du cristal biréfringent permet de faire varier la différence de luminosité des deux images. La rotation correspondante est convertie en m.

Il faut que le filtre éteigne bien l'image la plus lumineuse. Alors, on le montera avec un index en regard d'un rapporteur 400 grades, plus pratique ici qu'une graduation en degrés, pour mesurer les angles. La marche à suivre est la suivante. On place les images en carré :

- 1/extinction de AB en tournant le polaroïd (fig. xII.20), noter l'angle ;
- 2/recherche de l'égalisation entre A et B' en continuant à tourner dans le même sens, noter l'angle ;
- 3/maintenant, c'est A' et B' qui vont s'éteindre, noter l'angle ;
- 4/toujours en tournant : égalisation de A' et B, noter cet angle.

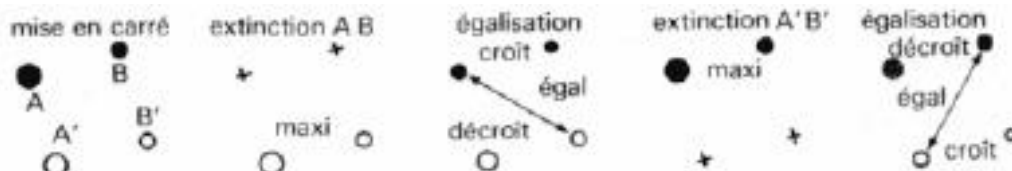


Figure XII.20 - Mesure de Δm avec un micromètre à double image complété par un polaroïd tournant.

Après échange des images (l'image extraordinaire se déplace symétriquement par rapport à l'image ordinaire pour refaire un carré de l'autre côté), on recommence les quatre opérations. On se trouve alors avec deux séries de valeurs qui se ressemblent à la centaine de grades près (voici l'avantage indiqué). Après le calcul des moyennes, on effectue la soustraction entre les deux-égalisations de part et d'autre d'une extinction donnant l'angle α (point 2 ci-dessus) en grades. Alors : $m = 5 \cdot \log(\operatorname{tg} \alpha)$.

Cette méthode permet des déterminations de m à mieux que $0,1 \text{ mag}$. Pour aller toujours plus loin, l'adjonction de filtres colorés dont le maximum de transmission est connu, permet des mesures colorimétriques. C'est ce qu'avait réalisé P. Muller en 1949 et 1951, mesures qui n'ont jamais été reprises pour des couples aussi serrés que $0,45''$.

4.10 - LES MESURES PAR INTERFÉROMÉTRIE

Si on place devant l'objectif un écran percé de deux fentes d'écartement variable symétriques par rapport au centre de l'objectif (cet écran doit être conçu pour pouvoir pivoter autour de l'axe optique), on obtient d'une étoile un système de franges parallèles aux fentes. Quand l'écran tourne, les franges tournent si bien que l'on peut les orienter à la demande. Lorsqu'on écarte les fentes, les franges se resserrent ; à l'inverse, elles s'éloignent lorsqu'on rapproche les fentes. C'est l'expérience de Young. Cela donne donc une échelle variable pouvant être utilisée pour mesurer la séparation des binaires (voir figure XII.21a).



Figure XII.21 - Observation des étoiles doubles par interférométrie.
a : système de franges obtenu en observant un couple A-B ;
b : juxtaposition des franges de A et de B : netteté maximale des franges ;
c : alternance de franges de A et de B : bande continue.

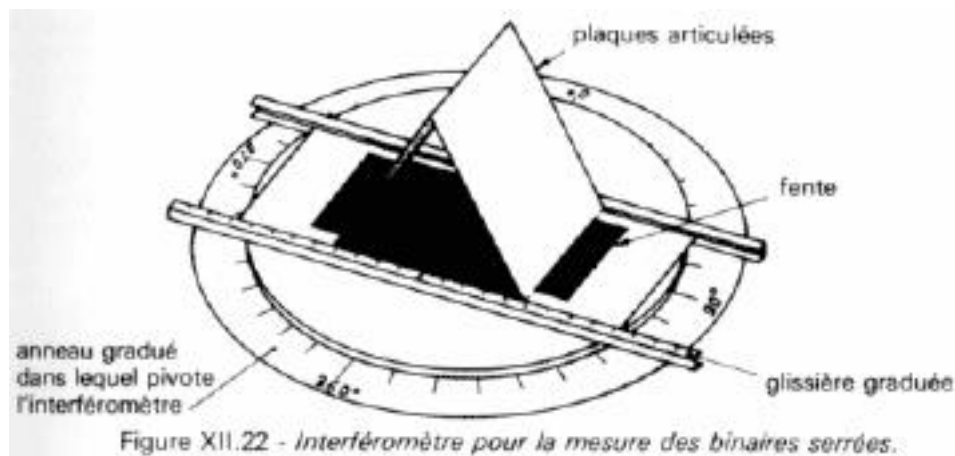
Pour un couple à composantes serrées, égales et suffisamment lumineuses, on voit deux systèmes de franges parallèles que l'on arrive à superposer par rotation de l'écran. Voilà un moyen de repérer l'angle de position à 180° près une fois que la direction du mouvement diurne a été notée, grâce à une platine graduée.

Pour la mesure de la séparation, on joue alors sur l'écartement des fentes. Si l'on augmente celui-ci, on voit les franges se resserrer et il arrive un moment où les franges de l'étoile A vont se superposer au système de B lorsqu'elles correspondent à l'écartement A-B. Les franges sont alors au maximum de netteté. Si l'on poursuit l'écartement des fentes, les deux systèmes vont s'alterner et l'on ne verra plus qu'une bande lumineuse continue (voir figureS xII.21b et XII.21c).

Dans la pratique, on commence par écarter les fentes au maximum. Les franges sont donc très serrées. En faisant pivoter l'écran dans un sens puis dans l'autre, on cherche à superposer les deux systèmes pour obtenir une seule bande continue et l'on note l'angle chaque fois pour déterminer θ . Alors, on commence à rapprocher doucement les fentes. Dès que l'on obtient parfaitement l'alternance (bande continue : franges au minimum de netteté), on mesure l'écartement D des fentes de l'interféromètre.

On a : $\rho(") = 206265\lambda/2.D$ où λ fait $0,56 \mu\text{m}$, et où D doit également être exprimé en μm .

Cette technique n'est pas très spectaculaire ; les franges sont fines et nécessitent au moins un grossissement de $2D$ pour être bien observées. Elle gâche beaucoup de lumière de surcroît, nécessitant l'utilisation de télescopes de bon diamètre. Un interféromètre constitué de deux fentes de 2 cm sur 20, monté sur un télescope de 31 cm, laisse passer la même quantité de lumière qu'un petit instrument de 9 cm d'ouverture. De plus, cette lumière se répartit entre les diverses franges, ce qui fait perdre 2 à 3 magnitudes, si bien qu'un tel montage ne permet pas d'atteindre mieux que des astres de magnitude 7 environ. Encore faut-il que le couple soit bien équilibré car un μm de 1 rend déjà les mesures difficiles ! Par contre, la technique interférométrique est peu sensible à la turbulence et permet de dépasser le pouvoir séparateur théorique : $0,20''$ contre $0,32''$ au mieux pour un instrument de 31 cm. On peut augmenter la luminosité des franges en élargissant un peu les fentes : cela réduit le nombre de franges, donc augmente la brillance de chacune d'elles.



La construction d'un interféromètre nécessite quatre plaques rectangulaires légères, articulées entre elles (longueur égale au diamètre de l'instrument, largeur égale au rayon) pouvant se plier en accordéon (fig. XII.22). Les plaques des extrémités qui portent chacune une fente placée tout près de l'articulation coulissent dans deux glissières graduées. Les plans du milieu ne servent qu'à empêcher toute autre lumière de pénétrer directement dans l'instrument et s'ouvrent plus ou moins suivant l'écartement des fentes. L'ensemble est monté sur un anneau qui pivote à frottement doux à l'intérieur d'un autre anneau gradué en degrés, fixé en haut du tube. Il est pratique de pouvoir commander l'écartement et la rotation des fentes sans déplacer l'oeil de l'oculaire.

Pour rendre les manipulations plus commodes sur de grands télescopes, Finsen a conçu en 1933 un système d'oculaire interféromètre, mais alors il devait prendre en compte le rapport de réduction. L'amateur n'a pas intérêt à reprendre ce dispositif qui nécessite une grande précision dans la réalisation.

5 - LES TECHNIQUES DE MESURE PAR EXPLOITATION D'IMAGES

5.1 - LA PHOTOGRAPHIE

Peu d'amateurs se sont livrés à cette activité dans le domaine des étoiles doubles, surtout pour en tirer des observations quantitatives, alors que les professionnels ont développé des programmes de mesure, aux U.S.A., en Italie et en France notamment. Pourtant, l'apparition d'émulsions nouvelles aurait dû offrir un attrait et une aide supplémentaire.

Ici encore, il faut amplifier la focale primaire, de l'ordre de 10 fois, pour obtenir une échelle suffisante, confortable pour la mesure ultérieure et pour que la tache d'Airy soit une dizaine de fois plus importante que le grain de l'émulsion. Cela peut s'obtenir par l'intermédiaire d'un oculaire propre, de bonne qualité, en essayant d'augmenter le plus possible le tube allonge afin de rendre les rayons émergents le plus parallèles possible.

Sachons bien qu'il subsistera quelques aberrations et distorsions, sauf dans la partie centrale du cliché. L'amplification γ se calcule par $\gamma = (t/f) - 1$ (t : tirage ; f : longueur focale de l'oculaire). L'idéal serait de remplacer l'oculaire par un objectif de photomicrographie de 16 mm, tout à fait conçu pour travailler dans ces conditions. Mais la pièce est onéreuse...

Une autre possibilité un peu encombrante mais correcte optiquement consiste à associer deux Barlow x3 pour donner un γ de 9. Le télescope Cassegrain montre ici un gros avantage car une seule Barlow suffit pour amener la focale résultante à 15m ou 20m, mais attention alors à la stabilité de cette distance focale si les pièces optiques ne proviennent pas d'un verre à faible coefficient de dilatation. Les variations de focale supérieures à 1/ 1000 perturbent l'échelle d'une même valeur risquant alors de détruire la constance des mesures d'une même séparation. Dans tous les systèmes d'amplification, on comprend qu'il faut maintenir le tirage constant d'une fois sur l'autre à l'aide de montages sûrs et stables permettant la remise en place des éléments toujours au même endroit.

La chambre photo doit être légère pour ne pas déséquilibrer l'instrument et lui causer des vibrations au moment des poses. Une visée reflex convient bien pour le centrage et la mise au point, à condition qu'elle soit claire et que les trajets optiques miroir-dépoli et miroir-plan focal soient égaux. Cette mise au point est particulièrement pointue si l'on utilise un système amplifiant (voir L'Astrophotographie - Techniques de l'amateur, de P. Martinez).

Le guidage étant osé avec de telles focales, il vaut mieux que l'équatorial ait un entraînement irréprochable au moins pendant une minute et soit bien orienté (méthode de Bigourdan).

C'est déjà tout cela qui conditionne la qualité des images stellaires obtenues. Ces images devraient dans l'idéal être celles du disque d'Airy. En réalité, la turbulence et la diffusion dans les couches sensibles font que l'on n'obtient qu'une tache de diffusion photographique. Dans le cas d'un F/D résultant de 62,5, le diamètre théorique de 0,08 mm est très rarement atteint. Dans les meilleurs des cas, il sera de 0,1 mm et montrera un pic blanchâtre auréolé de rouge orangé. Pour cette raison, il est intéressant d'utiliser une émulsion couleur avec un temps de pose correspondant à un rendement quantique équivalent maximum (ne pas trop poser). La Fujichrome 400 convient bien. Une courbe empirique tenant compte du défaut de réciprocité est donnée figure XII.23 en basant l'exposition sur la magnitude de la plus faible composante.

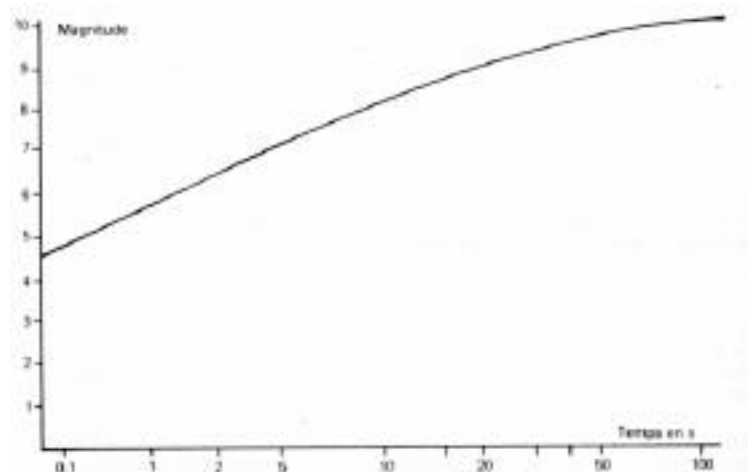


Figure XII.23 - Magnitude atteinte en fonction de la durée de la pose pour $D = 200$ mm, $F/D = 62,5$, avec un film ISO 400/27. Il a été tenu compte de l'erreur de réciprocité.



Figure XII 24 - Albireo (β Cygni) : 4 poses successives de 1s à 4s désignant l'Ouest (à gauche), donc le Nord (en bas) avec des intervalles croissants. $F = 12,5m$, agrandissement environ 15 fois, pellicule Ekta 200. Photo Durand-Simier.

L'exécution des clichés se pratique de la façon suivante. Première étape : acquisition au chercheur de l'objet (un chercheur puissant est bien utile car le champ photographié est réduit) ; centrage, vérification du couple à l'aide du dispositif de visée et mise au point soignée. Deuxième étape : armement, occultation manuelle du tube du télescope ou de la lunette à l'aide d'une raquette, déclenchement de l'obturateur de la chambre, dégagement du tube dès que les vibrations sont amorties en comptant les secondes de la pose, obturation du tube (pas de la chambre). Troisième étape : reprise de la deuxième étape après avoir coupé quelques secondes l'entraînement pour décaler les poses. On opère ainsi quatre poses sur le même cliché, les premières inférieures au temps théorique, les dernières supérieures à cette valeur. On arrête l'entraînement 2s entre la première et la deuxième, 3s entre la deuxième et la troisième, 4s entre la troisième et la dernière. Cela a pour effet d'orienter le cliché : les images les plus posées et les intervalles les plus longs désignent la direction de l'Ouest.

Ensuite, on change de vue (réarmement) puis : nouvelle mise au point et reprise de l'ensemble des opérations ; enfin, de même pour une troisième vue. De cette façon, douze images sont réalisées à des mises au point et à des temps de pose sensiblement différents au cours de la même nuit, données que l'on note soigneusement dans un carnet. Par la suite, il faudra reprendre la même double deux autres nuits, consécutivement si possible.

La mesure des clichés est de préférence réalisée avec une machine à mesurer micrométrique que l'on peut récupérer ou construire à partir d'un micromètre à fil, suivant le modèle de la figure XII.25. On peut opérer par pointés comme au micromètre à fil, ou mesurer des coordonnées rectangulaires que l'on convertira en coordonnées polaires ; de toutes manières, dans chaque cas, il faudra réaliser quatre ou cinq pointés pour obtenir une moyenne représentative.

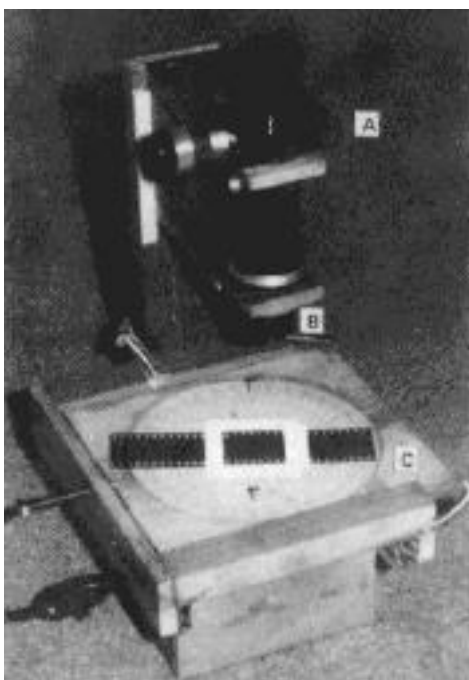


Figure XII.25 - Machine à mesurer les clichés composée d'un micromètre pour microscope (A) installé sur un objectif d'agrandisseur (B) $f = 50mm$ servant à agrandir une douzaine de fois l'image montée sur une platine mobile (2 translations perpendiculaires, 1 rotation). Photo P. Durand.

On peut aussi utiliser l'agrandisseur monté à son rapport maximum, bien mis au point (veiller à ce que le plateau soit bien perpendiculaire à l'axe de projection). Un fil noir, tendu et collé à la pâte adhésive, donne la direction E-W, un autre bissecte les deux disques de la meilleure image d'une vue de quatre, pour donner l'angle de position. A la lumière, on relève l'angle. θ sera obtenu en partant de la moyenne de quatre ou cinq pointés, par calcul, en déterminant la direction du Nord qui sert d'origine. Pour la mesure des séparations, on aura avantage à utiliser un pied à coulisse dont chaque bec sera prolongé par une aiguille collée. Avec leur bout que l'on recourbe, il suffit de pointer le centre des taches, de lire une fois avec les pointes écartées, une autre fois les pointes croisées (double mesure) et d'effectuer la soustraction (voir figure XII.26). Ne pas oublier de reprendre ceci quatre ou cinq fois pour obtenir une moyenne de chaque meilleure image des trois vues, puis une moyenne générale pour la nuit.

En opérant toujours dans les mêmes conditions, on pourra passer à l'étalonnage de l'ensemble focale-dispositif de mesure à l'aide des couples énumérés aux tableaux XII.5 et XII.6. Dans notre cas, par exemple, 0,60 mm donne 1".

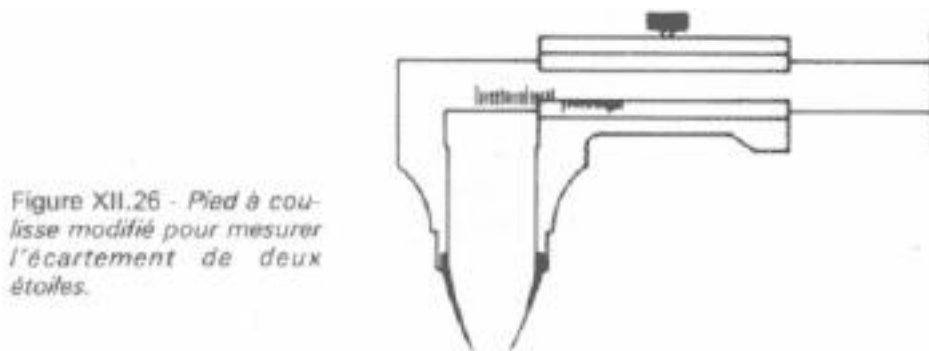


Figure XII.26 - Pied à coulisse modifié pour mesurer l'écartement de deux étoiles.

Par ce moyen, les professionnels obtiennent des incertitudes de l'ordre de 0,01" ; mais une installation d'amateur ne peut guère prétendre qu'à 0,1", la précision de lecture étant un peu meilleure que le dixième de millimètre. On peut faire un peu mieux avec un appareil à mesurer directement les clichés. Ces valeurs sont comparables avec les moyens directs : micromètre tournant ou à diffraction. L'avantage est que l'on peut enregistrer beaucoup d'images en une séance et les exploiter quand l'observation est impossible.

Des améliorations peuvent être obtenues en augmentant l'échelle et en réduisant la dimension des taches de diffusion, choses tout à fait contradictoires puisque l'augmentation du F/D résultant se traduit par un élargissement de la tache, pour des raisons d'optique géométrique mais aussi à cause d'une plus grande sensibilité aux vibrations et à la turbulence (allongement nécessaire de la pose). Un optimum peut être recherché. Pour un télescope de 200 mm, il se situe autour de 15m de longueur focale. Une bonne interprétation des images est source de progrès, surtout pour la localisation du photocentre. Les poses courtes ont tendance à donner des pics aléatoires qu'il ne faut pas confondre avec le véritable centre.

Cette technique s'adresse à des couples peu serrés supérieurs à 2" ou 3" car, lorsque les taches empiètent l'une sur l'autre, la séparation mesurée a tendance à être plus courte qu'en réalité. (Voir l'Astronomie, juin 1987).

5.2 - LES AUTRES SYSTÈMES DE MESURE

L'interférométrie des tavelures (tavelographie) s'est beaucoup développée ces dernières années (voir l'article de P. Baize, l'Astronomie, septembre 1982). Le principe consiste à atteindre le pouvoir séparateur des grands télescopes en figeant l'image perturbée par la turbulence. On additionne les images brèves obtenues sur une binaire à travers un filtre à bande passante étroite et on réalise avec cet ensemble une transformée de Fourier optique à l'aide d'un laser. Les franges obtenues donnent ρ et θ grâce à leur écartement et leur orientation. Mais maintenant, à l'aide d'une caméra à comptage de photons dont un ordinateur exploite l'image en temps réel, on obtient plus rapidement les données grâce à la détermination de la fonction d'autocorrélation qui restitue l'image. Les mesures obtenues par ce moyen ont permis de préciser l'orbite de nombreuses binaires visuelles à la limite des moyens classiques. La tavelographie a permis aussi d'empiéter sur le domaine des binaires spectroscopiques.

De son côté, à Uccle, J. Dommanget a cherché à exploiter des images fournies par une caméra électronique très sensible. Les progrès effectués dans ce domaine permettent à l'amateur d'utiliser ce dispositif, s'il possède une telle caméra et le magnétoscope qui lui est lié, comme une chambre photographique. Les caméras, en général relativement sensibles, peuvent enregistrer les étoiles les plus

brillantes. Après stockage sur bande, on peut choisir les images les meilleures et procéder aux mesures sur écran, mais mieux par procédé informatique.

La généralisation des CCD en a fait un instrument de choix pour la mesure en temps réel avec une précision comparable à la technique photographique. Cette technique se limite à des couples pas trop serrés, mais en progression constante. Voilà pour l'amateur ayant de sérieuses capacités en électronique et en informatique un moyen d'avenir, performant et rapide.

L'observation des binaires spectroscopiques constitue un autre défi à relever pour les possesseurs de télescopes Cassegrain de 400 mm qui cherchent un programme. L'observatoire de Toulouse s'est fait une spécialité dans ce domaine (Bouigue). Il a publié de nombreux catalogues de ce type d'objets. Un amateur peut envisager la construction d'un spectrographe (voir chapitre XVII), et tenter l'observation des binaires spectroscopiques. Il lui sera nécessaire en plus d'utiliser une machine à mesurer pour établir la valeur du dédoublement des raies. Une telle installation serait bien sûr limitée en résolution et ne pourrait observer que les plus grandes vitesses radiales (à partir de quelques dizaines de km/s) mais un champ d'étude suffisant subsiste néanmoins pour les étoiles les plus brillantes (jusqu'à la magnitude 7 ou 8).

Enfin, il reste le suivi des binaires à éclipses qui ne font pas déjà partie d'un système multiple. Celles-ci concernant d'abord les variabilistes et nous renvoyons à ce chapitre.

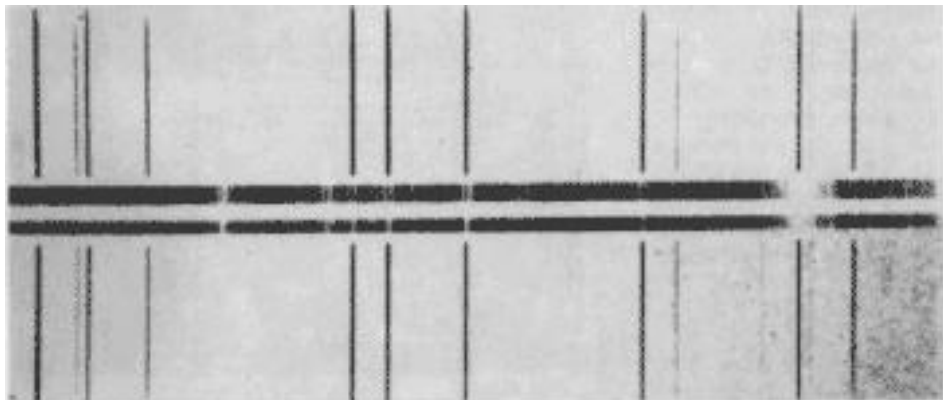


Figure XII.27 - Une binaire spectroscopique (spectre en négatif). On a ici deux positions du mouvement orbital. En haut, les mouvements sont opposés dans le sens de la ligne de visée, les vitesses sont maximales (ici, l'écartement des raies correspond à $+48 \text{ km/s}$ et -48 km/s ($P=26$ jours). En bas, le déplacement relatif est nul par rapport à l'observateur, on ne voit qu'une raie (les deux sont confondues). Photo C.N.R.S.-O.H.P.

6 - LES PROBLÈMES LIÉS A LA MESURE DES ÉTOILES DOUBLES

6.1 - LES EFFETS DE LA TURBULENCE ATMOSPHÉRIQUE

Très fréquemment, c'est elle qui va perturber les tests de la qualité optique d'un instrument. Ses manifestations sont variables quand on observe une étoile avec un grossissement au moins égal à deux fois la valeur du diamètre en mm. Elle peut se traduire par une image complètement floue ou indécise si l'objet est faible, rendant impossible toute mise au point. C'est le cas le plus sévère.

Le plus souvent, on observe une image avec des structures mobiles plus ou moins rapides : dédoublement, éclatement en grumeaux qui font qu'on ne voit jamais le disque d'Airy. En fait, il est encore présent mais en plusieurs exemplaires (il arrive d'ailleurs qu'on voie l'image se dédoubler sous ses yeux). Il faut à l'oeil un bon entraînement pour pouvoir analyser cette vision, mais l'enjeu est important : on peut percevoir la duplicité de chaque élément, comme P. Coureau l'a noté en octobre 1986 au télescope de 2m du Pic du Midi.

Moins ennuyeuse est l'agitation de l'image car la netteté est conservée. Cette situation s'observe souvent avec une petite lunette. Les anneaux sont souvent brisés, mais le disque reste à peu près rond bien qu'il se déplace rapidement de façon aléatoire d'une valeur de l'ordre de la seconde d'arc. Lorsque l'on pratique une mesure dans ces conditions, il n'est pas facile de bissecter cette bille qui ne cesse de

rebondir. L'oeil suit bien, alors que la plaque photo traduit cela par une énorme tache. Ces remous rapides sont souvent créés dans l'environnement proche de l'installation : rayonnement du sol, effet de trappe dans une coupole, rouleaux provoqués par le vent à l'arrière d'une colline ou d'un bâtiment.

Danjon a analysé la turbulence comme étant provoquée par une déviation des rayons lumineux en provenance de l'étoile. Lorsque cette déviation d'un petit angle t ne représente que $\rho/2$, $\rho(\ll) = 14/D(\text{cm})$, le disque est pratiquement rond et une duplicité peut être détectée. Avec $t = \rho/4$, l'anneau est bien observable et c'est dans cette situation que l'on peut étudier les cas difficiles : composantes proches et de luminosité inégale. Ceci n'arrivera pas toutes les nuits, mais il faut savoir patienter et faire avec les paramètres qu'on ne peut entièrement maîtriser.

Un petit instrument, surtout s'il est fermé, est moins sensible qu'un plus gros à la turbulence. Les cellules perturbées étant de l'ordre du décimètre, on comprend qu'on ne gagne rien à dépasser 30 ou 40 cm pour son objectif, sauf les rares nuits où les conditions seront exceptionnelles. Par contre, le gain en lumière permet à l'oeil de travailler dans de meilleures conditions pour séparer des astres faibles.

6.2 - LE CHOIX DU SITE

La mesure des étoiles doubles nécessite de voir le faux disque lorsque la séparation est faible, ce qui veut dire qu'on observe rarement des objets peu lumineux. Un ciel parfaitement pur permettant d'atteindre la magnitude limite n'est donc pas nécessaire. Ce serait même presque l'inverse. Il faut surtout une turbulence réduite, situation qui s'obtient en général lorsque le ciel est légèrement voilé, ralentissant le refroidissement nocturne.

Comme on opère avec de forts grossissements (2 à 2,5 fois la valeur du diamètre en mm), le fond du ciel est bien sombre vu à l'oculaire. Ainsi, l'on peut bien pratiquer en ville, justement là où la couverture brumeuse permanente atténue un peu la turbulence. Il suffit de se protéger de l'éclairage direct des lampadaires.

Les remous d'origine instrumentale étant éliminés (bon équilibre thermique, suppression des prises d'air), il faut penser à s'affranchir de la turbulence locale en élevant au maximum la prise d'onde pour sortir des remous nés au voisinage du sol. Trois mètres constituent un minimum, 5 à 10m un meilleur choix. On peut rêver d'une installation sur un château d'eau désaffecté... À éviter : les vallées se trouvant fréquemment sous une couche d'inversion.

Une bonne installation pourrait se constituer d'une coupole de 3,5m portée par une tour de quatre ou cinq mètres, contenant un télescope Newton à F/7 ou Cassegrain à F/15 de 30 cm (une lunette de 25 cm, équivalente, serait beaucoup plus encombrante). Un pare buée léger prolongera le tube pour sortir largement de la trappe de façon à ce que les échanges d'air ne perturbent pas l'image. Les températures intérieures et extérieures devront bien s'équilibrer. Dans le cas d'une installation au sol, en plein air, un pilier de 1 mètre entouré d'un plancher constituerait un bon compromis, le haut du tube culminant à environ 3 mètres. L'environnement géographique n'est pas à négliger. Il vaut mieux se trouver sur une colline au vent plutôt que sous le vent. Il faut éviter la proximité des bâtiments chauffés, surtout si la brise risque de ramener sur l'instrument des restes de chaleur ou si des habitations chauffées avec des cheminées masquent le Sud. La zone méridionale est en effet celle privilégiée pour l'observation. On essaie toujours d'observer les doubles lorsqu'elles sont au voisinage de la culmination car plus un astre est élevé au-dessus de l'horizon, moins l'observation est soumise à la turbulence. C'est pour cela que sous nos latitudes la mesure de binaires serrées à des déclinaisons négatives suppose de bonnes conditions et une part d'exploit.

Enfin, il est bon de rappeler que plus un instrument est loin du domicile, moins il a de chances de servir.

6.3 - LE CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE MESURE

On vient de voir que les moyens d'observation sont nombreux et variés, s'appuyant sur des principes physiques différents : échelle au foyer, diffraction, biréfringence des cristaux, interférométrie, enregistrement des images... On l'a vu, aucun appareil ne peut tout faire bien : haute définition, accessibilité aux couples faibles ou aux couples écartés. Il reste donc à choisir son programme en fonction de l'équipement ou sa technique en fonction du programme choisi. La figure XII.28a résume les diverses possibilités qui s'offrent à l'amateur suivant l'objectif que l'on s'est défini. Par exemple, un programme de mesure d'orbitales ne nécessite pas que l'appareil atteigne de grandes séparations mais qu'il permette par contre une mesure précise des couples serrés. Si l'on s'intéresse aux étoiles jeunes,

l'interférométrie ou la spectrographie sont préférables. On note enfin que tout cela explique pourquoi le micromètre à fil fait toujours bonne figure (voir figure XII.28b).

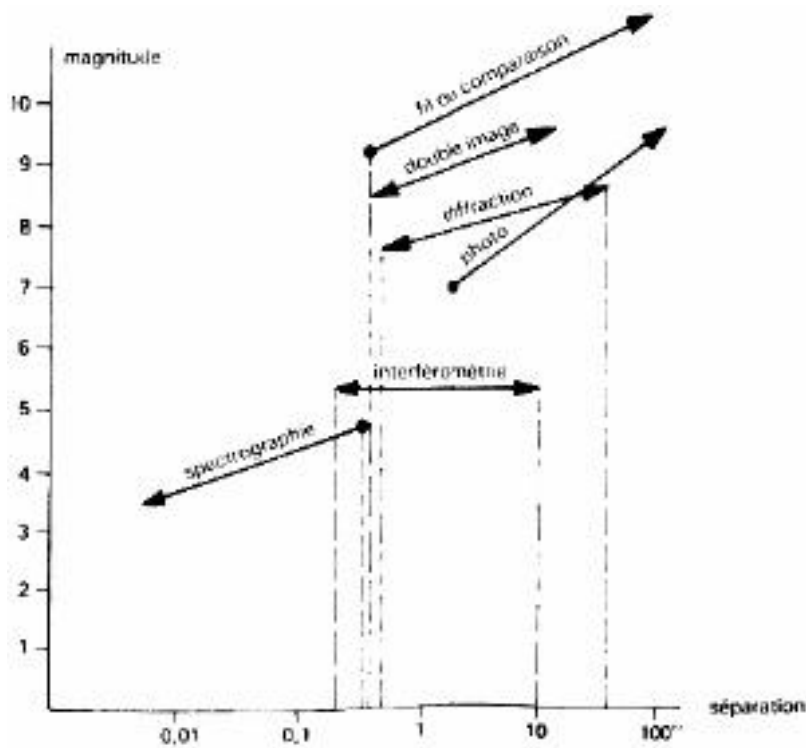


Figure XII.28a - Possibilités des techniques de mesure pour un instrument donné (d'ouverture 400 mm).

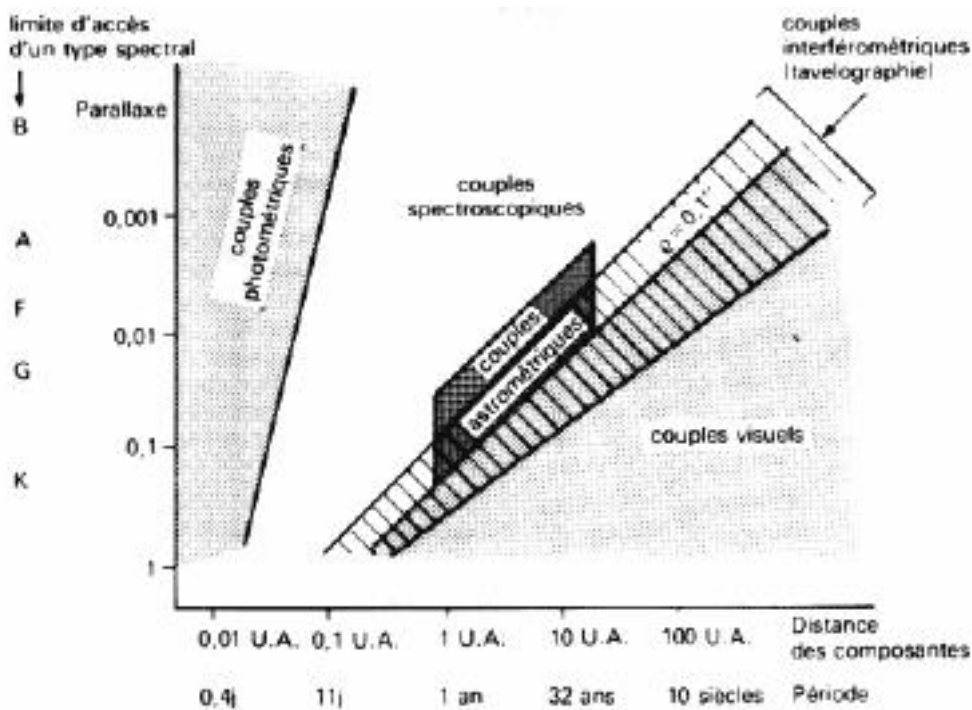


Figure XII.28b - Pénétration pour un appareillage donné (d'après J. Dommangeat et P. Coureau). On peut lier la Période à la distance des composantes pour supprimer une Période pour une séparation observée. De même, on peut lier un type spectral à une distance, celle-ci jouant le rôle de filtre, les types spectraux ayant une luminosité donnée.

6.4 - L'IDENTIFICATION DE L'ASTRE A OBSERVER

Si les doubles qui constituent une étoile visible à l'oeil nu sont aisément reconnaissables et pointables, il n'en va pas de même pour les plus discrètes. Au chercheur, rien ne ressemble plus à une étoile de magnitude 9 qu'une étoile de magnitude 9. Avant de commencer une mesure, il faut donc s'assurer que l'astre en question est bien celui qui figure sur le catalogue et qu'il est bien accessible en magnitude et en séparation à l'instrument équipé de son micromètre.

Le couple figure sur les catalogues sous forme de coordonnées α et δ pour une époque donnée (se livrer à un petit calcul de précession si nécessaire). Il est pratique d'utiliser un atlas de la même époque d'origine, suffisamment précis : A.A.V.S.O., Sky Atlas 2000, Becvar ; on cherche si l'astre y est représenté, sinon on repère son emplacement. Plutôt que de traîner des planches précieuses, il vaut mieux calquer le champ et procéder ensuite à cette reconnaissance à l'oculaire. Tout ce travail de préparation doit se faire avant, en prévoyant toujours large au cas où une bonne soirée s'annonce sans que l'on ait eu le temps de la préparer spécialement : il faut toujours être prêt à observer.

Repérée à l'oculaire grâce à son champ, la double est ensuite centrée et examinée avec l'oculaire de travail car une vérification de ses caractéristiques s'impose : magnitudes, angle de position, séparation. Ces deux dernières sont bien sûr susceptibles de changements. Si, en plus, les magnitudes diffèrent nettement, un examen des étoiles voisines se justifie et, en dernier ressort, une vérification à partir du catalogue. Pour avoir négligé ces principes de simple bon sens, des observateurs se sont laissés piéger, prenant une double pour une autre, d'où présence dans les fichiers de mesures aberrantes.

6.5 - L'ÉTALONNAGE DES SYSTÈMES

Dans la mesure des positions relatives des composantes d'un couple, la détermination de l'angle θ ne pose en général aucun problème si la monture est bien construite, bien orientée et si l'on a pris soin de choisir une étoile près de l'équateur céleste pour repérer le Nord, à 90° près, grâce au mouvement diurne.

La mesure de l'écartement ρ nécessite par contre de connaître l'échelle au foyer de l'instrument et d'utiliser un système de mesure sensible et fidèle à ce même foyer.

Sur les télescopes, l'utilisation d'un système amplificateur de focale fait que l'on ne peut connaître directement la longueur focale résultante, donc l'échelle. Il se peut que l'on ne soit pas sûr non plus du système de mesure. Le plus grave est le manque de fidélité qui affectera la précision. L'étalonnage se propose de déterminer ces inconnues.

Le bon sens indique qu'un bon étalonnage se fera en situation d'emploi. Il s'agit de mesurer des distances connues et de relever la valeur indiquée sur l'appareil de mesure (le micromètre). Leur rapport fournira le coefficient d'étalonnage e . On pourra construire sur un graphique la fonction de e à l'aide du nuage de points, et vérifier si elle passe par l'origine. Cette valeur doit être connue avec une précision largement supérieure à la sensibilité du micromètre, de façon qu'elle n'augmente pas les incertitudes sur les distances mesurées (lorsque les erreurs se trouvent à aller dans le même sens).

Cette opération doit donc être faite avec le plus grand soin. Cela suppose d'utiliser des étalons les plus sûrs possibles, les plus variés possibles, dans leur nature, leur écartement. Opération longue, qui n'empêche pas, bien sûr, d'entreprendre parallèlement un programme régulier, la mise au net ne se faisant que lorsqu'on considèrera l'étalonnage terminé (il nous a fallu deux ans et 46 mesures pour connaître celui de notre micromètre à lame de spath). Voici quelques méthodes :

- Les passages :

On choisit en général une étoile assez haute en déclinaison (entre le zénith et le pôle de préférence), dans la période où elle passe au méridien. On mesure le temps de passage de l'astre correspondant à l'intervalle des deux fils du micromètre. On déclenche son chronomètre lorsqu'il est juste sur le premier fil et on l'arrête lorsqu'il est juste sur le second. Avec un micromètre à double image, ce sont les deux images provenant de l'astre qui passent derrière un seul fil. Les fils doivent être parfaitement perpendiculaires au mouvement diurne. La moyenne de dix transits successifs répétés sur trois nuits, pour des écartements progressifs (10, 20, 30, 60 ») permettra de vérifier la bonne proportionnalité du micromètre. Grâce à la moyenne des trente mesures, on calcule la valeur angulaire de l'écartement des fils à l'aide de la formule : $d(\llcorner) = 15.t.\cos\delta$, où t est le temps de transit exprimé en secondes. Il est, évident que l'erreur relative sur les transits pour 10 » sera supérieure à celle pour 50''.

- Couples très écartés :

On peut réduire l'incertitude relative de l'étalonnage en travaillant sur des couples très écartés. C'est pourquoi Danjon (Lunettes et Télescopes) propose de mesurer, dans les Pléiades, la différence de déclinaison 24-Alcyone : 659,78 » pour 1984 ; Alcyone-22 : 686,25 » (1984) ; Caelaeno-Electra : 632,74 » (1984). Plus proches : Astérope I-II : $\rho = 152,12$ ». Dans Uma, bien connues, Mizar et Alcor sont écartées de 708 » (Couteau, Observation des étoiles doubles).

- Réseau de diffraction (voir paragraphe 4.5) :

Avec des bandes magnétiques de cassette de 3,81 mm de large, le pas du réseau fait 7,62 mm, il donne deux images symétriques de la principale, séparées de 30,32 » pour $\lambda=0,56\mu$. Sur une étoile brillante, peut-être pourra-t-on mesurer les images du second ordre. L'incertitude de ce système provient de la sensibilité chromatique de l'oeil. Le moyen d'y remédier est de l'associer à un filtre dont on connaît bien le maximum de transmission.

- Utilisation de mires :

On peut encore mesurer des étoiles artificielles : petit trou percé avec une aiguille dans une feuille d'aluminium ménager, éclairé par derrière par une ampoule. Il faut éloigner le plus possible cette mire de façon qu'optiquement elle soit à l'infini : quelques centaines de mètres pour 3m de focale.

Dans ce cas, la mesure de l'écartement des trous ne pose pas de problème. Deux trous distants de 5 cm vus à 300m sous-tendent 34,38 ». A l'aide d'un régle, on peut mesurer l'écartement à 0,1 mm près, donnant une faible incertitude. Par contre, arpenter 300m à quelques décimètres près n'est pas évident, mais c'est possible.

Du fait que la mire ne peut pas être tout à-fait considérée à l'infini, son image ne se forme pas exactement dans le plan focal de l'instrument, mais juste en arrière. La conséquence est que l'étalonnage par mire donne une mesure de la distance focale de l'instrument supérieure à la distance focale réelle F d'une valeur ε telle que $\varepsilon/F = F/d$, où d est l'éloignement de la mire. L'échelle des images est dilatée dans les mêmes proportions ; il convient donc de calculer la correction à apporter. Celle-ci serait par exemple de 1 % pour une distance focale de 3 mètres et un éloignement de la mire de 300 mètres.

- Couples étalons de Muller – couples orbitaux :

Dans le Journal des Observateurs (titre aujourd'hui disparu), en novembre 1949, Paul Muller avait publié une liste de 15 couples dont les mesures depuis Struve montraient une certaine fixité. Avec le temps, cette fixité s'est confirmée pour la plus grande partie d'entre eux. Quelques-uns trahissent un mouvement. Pour ceux-là, une anticipation de ce mouvement a été déterminée par J. Minois avec des moyens informatiques en traitant l'ensemble des mesures. Nous-mêmes, graphiquement, l'avons fait en n'utilisant que les mesures photo. Nous avons ajouté deux couples qui présentent les mêmes caractéristiques, situés après 20h d'ascension droite, ceci afin de couvrir tout le ciel (voir tableau XII.5a).

Par ailleurs, quelques binaires, depuis leur découverte, ont déjà bouclé une orbite ; d'autres l'ont quasiment fait. Leur mouvement est bien connu à quelques centièmes de seconde d'arc sur les distances, le calcul de l'orbite ayant intégré toutes les mesures. Malheureusement, ces cas sont rares (voir tableau XII.5b).

Tous ces couples sont utiles pour établir et contrôler l'étalonnage du micromètre, à condition encore d'en mesurer une dizaine. Alors, les incertitudes de position ont, statistiquement, plus de chance de se compenser. La mise en évidence d'un écart systématiquement trop grand ou trop petit conduira à rectifier l'étalonnage. Présentant de grandes variétés d'aspect, ils ont en outre l'avantage de contrôler la fidélité de l'ensemble instrument-micromètre-observateur.

N° ADS			Position 1950 (2000)		Moy.	Moy.	Hypothèse 85		HIP
					1840	1960	Drd.	Min.	1991,2
683	61	65Pis	0h47,2(49,8)	27° 26(43') mag. vis. : 6-3-6,3	θ 298,5 ° ρ 4,42"	296,1 4,35"	295,8° 4,30"		295,9° 4,331''
3297	559		4h30,6(34,6)	17° 55(57) 6,9-7,0	278,1° 3,22"	276,9° 2,96"	277,0° 3,07"		
3353	572		4h35,2(38,5)	26° 51(56) 7,3-7,3	210,3° 3,17"	195,0° 3,96"	192,5° 4,12"	190,2° 4,15"	
3734	644		5h09,6(10,4)	37° 14(18) 6,8-7,1	220,4° 1,60"	221,0° 1,59"			
5436	958		6h44,0(48,3)	54° 46(43) 6,3-6,3	256,7° 5,07"	257,0° 4,76"	256,8° 4,68"		
7034	1282		8h47,6(50,9)	35° 15(04) 7,5-7,5	277,4° 3,40"	278,2° 3,58"	279,0° 3,60"		
7286	1333		9h15,4(18,5)	35° 35(22) 6,4-6,7	40,9° 1,52"	47,5° 1,78"	50,0° 1,80"	48,5° 1 80"	
9338	1864	ε Boo	14h38,4(40,7)	16° 38(26) 4,9-5,8	99,4° 5,84"	107,5° 5,62"	110,0° 5,62"	105,7° 5,74"	109,8° 5,546 ''
9737	1965	ζ CrB	15h37,5(39,4)	36° 48(38) 5,1-6,0	300,5° 5,97"	304,1° 6,27"	304,8° 6,29"		305,2° 6,324''
9969	2021		16h11,0(13,3)	13° 40(33) 7,5-7,6	317,9° 3,32"	345,8° 4,11"	351,0° 4,12"	351,3° 4,31"	
10526	2161'	ρ Her	17h22,0(23,7)	37° 11(08) 4,5-5,5	308,8° 3,66"	315,9° 4,02"	317,0° 4,03"	317,7° 4,07"	318,3° 4,066''
10597	2180		17h27,8(29,0)	50° 27(53) 7,7-7,9	265,3° 3,17"	260,5° 3,07"	260,5° 3,07"		
10905	2245		17h54,2(56,4)	18° 20(20) 7,4-7,4	294,2° 2,49"	292,7° 2,49"	293,0° 2,68"		
11640	2375		18h43,0(45,5)	5° 27(30) 6,2-6,6	112,5° 2,34"	116,7° 2,41"	118,5° 2,49"		
12962	2583	π Agl	19h46,4(48,7)	11° 41(48) 6,1-6,9	121,6° 1,45"	110,0° 1,41"	107,6° 1,43"		107,5° 1,437''
15007	2799		21h26,4(28,9)	10° 52(65) 7,5-7,5	331,3° 1,42'	275,6° 1,61"	267,0° 1,74"	265,9° 1,68"	
16270	2944AB		22h45,3(47,9)	-4° 29(13) 7,3-7,8	247,6° 4,03"	275,8° 2,58"	284,0° 2,30"	283,8° 2,31"	

Tableau XII.5a - Quelques binaires très stables.

N° ADS	Σ		Position 1900 (2000)		1980	1985	1990
8119	1523	ξ UMa	11h12,8(18,2)	31° 66(33) mag. vis. : 4,4-4,9	θ 104,7° ρ 2,92"	91,1° 2,33"	60,1° 1 27"
8630	1670	γ Vir	12h36,6(41,7)	- 0° 54(87) 3,6-3,7	297,0° 3,92"	292,9° 3,52"	287,6° 3,06"
9413	1888	ξ Boo	14h46,8(51,4)	19° 31(07) 4,8-6,7	332,9° 7,22"	329,3° 7,16"	325,5° 7,04"
10157	2084	ζ Her	16h37,5(41,4)	31° 47(36) 3,0-6,5	141,6° 1,26"	109,6° 1,44"	84,4° 1,57"

Tableau XII.5b - Quelques binaires bien connues (éphéméride calculée par J. Minois),

N° ADS	Nom	Magnitude	Position 1950	θ et ρ extrapolés pour 1987
639	STF1 App1	7,4-7,5	0h43,7 N 30° 40	47,7° 47,1"
4000	- 698	6,5-8,0	5h21,9 N 34° 49	347,6° 31,2"
6988	- 1268	4,2-6,8	8h43,7 N 28° 57	307,5° 30,41"
8600	- 1657	5,2-6,8	12h32,6 N 18° 39	270,5° 20,24"
8706	- 1692	2,9-5,5	12h53,7 N 38° 35	228,4° 19,38"
8891	- 1744	Mizar	13h21,9 N 55° 11	151,8° 14,42"
9737	- 1965	5,1-6,0	15h37,2 N 36° 48	305,2° 6,29"
9933	- 2010	5,3-6,5	16h05,8 N 17° 11	12,4° 27,50"
10759	- 2241	Ψ Dra	17h42,8 N 72° 11	16,2° 30,21"
11745	- 39App1	β Lyr	18h48,2 N 33° 18	148,5° 45,72"
12540	- 43 Appt	β Cyg	19h28,7 N 27° 51	54,6° 34,34"

Tableau XII.5c - Sélection de 11 couples écartés, quasiment fixes, pouvant servir d'étalons pour des mesures photo.

Dans le même esprit, signalons l'intérêt de l'observation régulière de ε1 et ε2 Lyr P. Muller a réalisé une étude sur elles, montrant la fiabilité du micromètre à double image, par rapport au système filaire.

La démarche dans la phase d'étalonnage peut se résumer ainsi. Dès que l'on a son matériel un peu en main, que l'échelle au foyer est dégrossie, on peut entreprendre un programme de mesure en veillant à observer à chaque séance un couple étalon ou une orbitale bien connue. Progressivement, l'étalonnage sera précisé et, en cas de doute sur le matériel, lors d'une observation, il subsistera toujours un élément connu. Pour la photographie, voir le tableau XII.5c.

Pour terminer, nous ne pouvons que redonner le conseil de Paul Couteau : « Commencez par publier de bonnes mesures pour être pris en considération, sinon vous risquez d'être définitivement catalogué. »

6.6 - LE CHOIX D'UN PROGRAMME

Au début, quand l'on démarre dans l'astronomie des étoiles doubles, on n'imagine pas toutes les possibilités de recherches et l'on se demande quoi faire. Voici quelques pistes qui pourront mettre sur la voie. Par la suite, chacun se trouvera une spécialité.

Vérifications d'identification :

Il s'agit de doubles faibles, en général jamais réobservées après la découverte, dont la position n'est pas précise et que l'on risque de confondre avec une voisine. C'est un programme lancé par l'équipe qui travaille au C.C.D.M. Pour 2 ou 3 ans encore, des observations seront nécessaires. Aucun micromètre

n'est indispensable. Il suffit d'un bon atlas et d'une bonne capacité à dessiner le champ observé. C'est à la Commission des Etoiles Doubles de la S.A.F. qu'il faut demander les programmes car elle est chargée de cette coordination pour notre pays.

Mesure des couples négligés :

Des couples écartés présentant souvent un fort m ont été peu mesurés depuis leur découverte. Il se peut que certains aient esquissé un mouvement depuis : les réobservations sont urgentes. Le micromètre à fil ou à comparaison, la photographie, sont bien adaptés à de telles recherches. Une liste de 106 objets a été préparée à la Commission des Etoiles Doubles de la S.A.F. A partir de ces réobservations, nul doute que la découverte d'un mouvement relatif rectiligne, donc la mise en évidence d'un couple optique, récompensera les observateurs assidus. Eventuellement, pour aller plus loin, un programme plus spécifique pourra être entrepris. Un catalogue existe déjà, préparé par Dommanget et Nys et édité par l'observatoire d'Uccle en Belgique, montrant que 20 % de couples proches sont optiques. Tous ne sont donc pas recensés. C'est une contribution spécifique mais très intéressante car elle permet, grâce à des observations méridiennes, de déterminer des mouvements propres et par là les mouvements des étoiles au sein de la Galaxie (voir tableau XII.6a).

N° STF	N° ADS	Coordonnées 2000	$m_1 - m_2$ / \	Première obs.			Dernière obs.			Notes
				année	θ	ρ	année	θ	ρ	
132AB	1202	01h32,1 N16°57	6,9 - 9,9	1783	28°	15,8"	1961	344°	58,0"	multiple
510	3054	04h12,1 N00°44	6,9 - 9,9	1831	300°	10,8"	1964	301°	11,0"	
560	3284	04h31,5 S13°39	6,2 - 9,1	1901	44°	29,8"	1919	45°	29,8"	
889	4930	06h19,9 N25°01	7,6 - 9,9	1830	222°	22,0"	1957	237°	21,3"	
1034	6047	07h24,0 S03°59	7,1 - 9,6	1830	285°	13,3"	1960	286°	14,6"	
1803	9111	14h06,4 N38°25	8,1 - 9,9	1831	43°	17,8"	1967	43°	18,0"	
2431	11910	18h58,8 N40°42	6,2 - 8,5	1829	236°	18,7"	1969	236°	19,0"	
2844	15408	21h51,8 N64°53	7,2 - 9,2	1903	258°	11,2"	1916	261°	12,0"	
2982	16550	23h09,5 N08°40	5,4 - 10,0	1831	188°	32,6"	1923	198°	32,9"	
3028	16894	23h38,5 N35°02	7,1 - 9,6	1829	205°	19,5"	1961	201°	19,2"	

tableau XII.6a - 10 coup/es négligés à mesurer.

Nom	N° ADS	Coordonnées 2000	$m_1 - m_2$ / \	Ephémérides 1988		Notes
				θ	ρ	
STF547	48	00h05,4 N45°49	8,9 - 9,0	177°	5,9"	multiple
STF13	207	00h16,3 N76°57	6,8 - 7,1	55°	0,9"	multiple
STT18	588	00h42,4 N04°10	7,8 - 9,4	206°	1,5"	
BU1100	999	01h14,7 N60°57	8,3 - 8,3	33°	0,5"	
STF186	1538	01h55,8 N01°51	6,8 - 6,8	56°	1,3"	multiple
STF305	2122	02h47,5 N19°22	7,4 - 8,2	308°	3,7"	
STF400	2612	03h34,9 N60°02	6,8 - 7,6	266°	1,4"	multiple
STF1110	6175	07h34,6 N31°53	2,0 - 2,9	78°	2,9"	c'est Castor
STF2383	11635CD	18h44,3 N39°40	5,2 - 5,5	88°	2,3"	c'est ε_2 Lyr ε_1 est dans le même champ
STF2737	14499	20h59,1 N04°18	6,0 - 6,3	285°	1,0"	multiple

Tableau XI1.6b - 10 orbitales à mesurer.

Mesure des couples orbitaux :

A partir du Quatrième Catalogue d'Ephémérides de Muller-Couteau, le suivi de couples en mouvement orbital constitue un autre type de programme spécifique, à la condition qu'un tri sérieux basé sur les couples effectivement accessibles précède toute observation. En effet, beaucoup d'entre eux sont à la limite des instruments moyens de l'amateur, mais il reste quand même du travail à faire. Des observations précises apporteraient des mesures nouvelles pour améliorer les orbites premières déjà calculées dont un grand nombre ne sont pas très sûres. Si les couples ne sont pas trop faibles, l'outil de choix est le micromètre à double image : l'un des trois modèles décrits plus haut. Pour une sélection d'objets, voir tableau XII.6b.

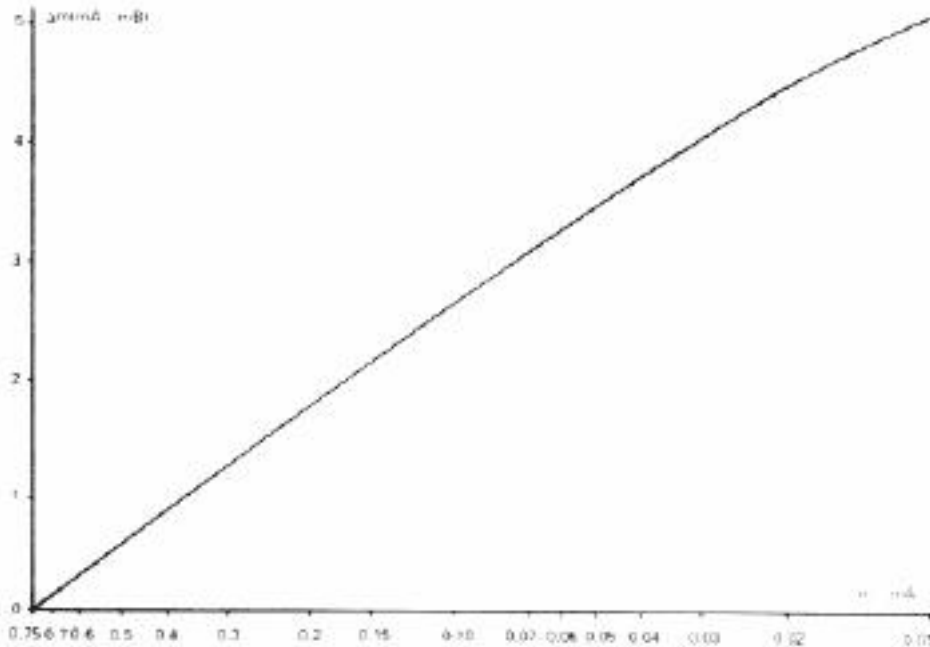


Figure XII.29 - Composition des magnitudes (d'après P. Muller). Exemples d'utilisation :
1) soient $m_A = 8,7$ et $m_B = 8,2$, d'où $\Delta m = 0,5$; $m - m_A$ donne (graphique) 0,52, donc $m = 8,2 - 0,52$ ou $m = 7,3$ environ.
2) soit $\Delta m = 1,3$ et $m = 4,5$; Δm donne (graphique) 0,3 pour $m - m_A$, d'où $m_A = 4,5 + 0,3 = 4,8$, $m_B = 4,8 + 1,3 = 6,1$.

Recherche de doubles nouvelles :

Dans le domaine des doubles visuelles, cette recherche n'est guère possible pour l'amateur insuffisamment équipé, mais elle peut s'effectuer fortuitement en examinant les étoiles du champ d'une double déjà connue. Il convient alors d'en donner les coordonnées précises à l'aide des étoiles du champ et d'un catalogue. Dans le même ordre d'idée, P. Baize avait signalé plusieurs doubles énigmatiques dans deux articles parus dans l'Astronomie de janvier et avril 1982. Par contre, un programme original de recherche d'algolides dans les couples déjà connus pourrait être entrepris à base de déterminations fréquentes du m des doubles choisies. On a vu précédemment que ces objets étaient hiérarchisés. Il se pourrait que dans certains cas, l'une des composantes soit une double photométrique, créant périodiquement une variation du m . Des observations fréquentes sur plusieurs jours, ou plusieurs mois, par la méthode d'Argelander ou, mieux, à l'aide d'un photomètre à double image, plus précis, devraient montrer ces phénomènes dans les couples un peu serrés (une à quelques secondes d'arc). Lorsqu'on connaît la magnitude globale d'un tel couple et son m , la figure XII.29 permet de calculer la magnitude de chaque composante. P. Baize avait publié un catalogue d'étoiles doubles ayant une composante variable en 1962 ; il est toujours intéressant. Voir aussi le catalogue de m de Vierzbinski (Wroclaw).

Dans toutes ces recherches, l'isolement de l'observateur ne constitue pas la meilleure des choses. Il ne faut plus se baser sur l'image de l'astronome seul au sommet de sa tour. Le travail d'équipe est un facteur de soutien et d'émulation.

7 - EXPLOITATION DES MESURES

7.1 - LES ORBITES

Un observateur peut fort bien se contenter d'effectuer des mesures. On l'a vu, le nombre de couples suffit largement à sa peine. S'il veut aller plus loin, il peut envisager de se lancer dans la détermination d'une orbite.

C'est un travail délicat qui demande une grande connaissance de son sujet car il faut traiter parfois plusieurs centaines de mesures plus ou moins précises qu'il faut savoir interpréter pour en tirer une bonne orbite qui n'encombre pas inutilement les catalogues, tel celui de Worley-Heintz (1983).

L'orbite apparente, une ellipse, telle qu'on l'obtient directement d'après les mesures (voir figure XII.31) est l'orbite réelle, une autre ellipse, projetée sur le plan perpendiculaire à la ligne de visée. Partant de là, des considérations géométriques permettent de remonter à l'orbite réelle qui se caractérise grâce aux valeurs suivantes :

- éléments propres au mouvement et à la forme de l'ellipse : P, période en années ; T, date de passage au périastre ; a, demi grand axe en secondes de degré ; e, excentricité
- éléments fixant la position de l'orbite dans le ciel (dits de Campbell) : i, inclinaison du plan de l'orbite vraie sur le plan de projection compté de 0 à 90° si le mouvement est direct (θ croît avec le temps), et de 90 à 180° s'il est rétrograde (θ décroît) ; Ω , angle de position du noeud compté de 0 à 180° (c'est l'angle que forment la ligne d'intersection du plan de l'orbite vraie avec le plan de projection et la direction du Nord) ; enfin, ω , l'angle pour l'orbite vraie entre la ligne des noeuds et le grand axe compté de 0 à 360° dans le sens du mouvement (voir figure XII.32).

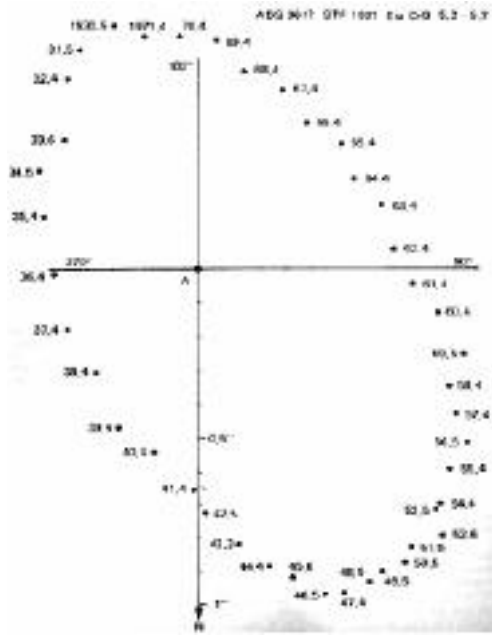


Figure XII.31 - Orbite apparente d'une binaire visuelle de 1930 à 1971. Les mesures, relevées à partir des publications, sont moyennées par année puis portées sur une feuille, à l'aide du rapporteur et du double décimètre.

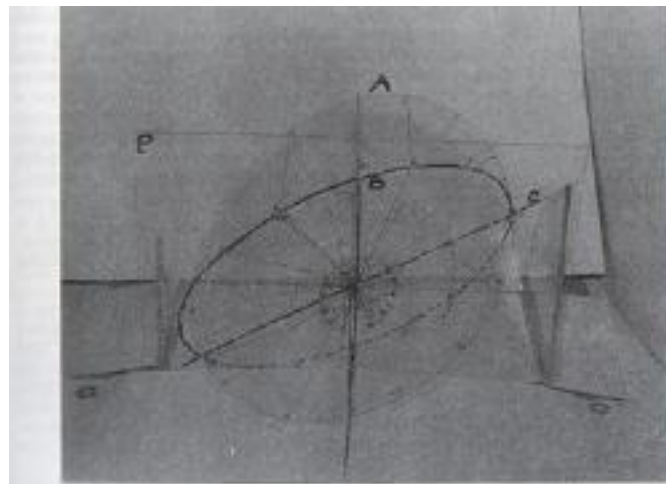


Figure XII.32 - Maquette réalisée par E. Nègre, montrant l'orbite réelle A projetée sur le plan P perpendiculaire à la ligne de visée, pour donner l'orbite apparente B. On voit la ligne des noeuds C (intersection entre les deux orbites).

Le calcul des éléments de l'orbite réelle est la résolution classique du problème de deux corps qui gravitent non exactement l'un autour de l'autre, mais ensemble autour d'un centre de gravité commun, le barycentre. En général, on ne possède pas de mesures absolues des positions des composantes (bien que des programmes d'observation à l'astrolabe se mettent en place). Les valeurs de θ et ρ permettent seulement de rapporter la position de l'une des composantes à l'autre. A défaut de déterminer les orbites de A et de B autour du barycentre G (A, G et B sont toujours alignés), on va calculer une orbite homothétique de celles-ci : celle de B par rapport à A. C'est une orbite képlérienne, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une ellipse dont A est l'un des foyers, que le mouvement de B respecte la loi des aires, que les centres coïncident et que plusieurs diamètres sont conjugués.

7.2 - POURQUOI CALCULER DES ORBITES ?

Il est agréable intellectuellement de décrire par des lois simples, ces mouvements complexes en apparence, surtout quand ces formules permettent de déterminer pour l'avenir la position des corps impliqués dans ce mouvement.

Plus intéressante est l'utilisation que l'on peut faire en astrophysique des données géométriques et dynamiques a et P . On sait que $a^3/P^2 = MA + MB$ où MA et MB sont les masses des composantes exprimées en masses solaires, où a est exprimé en Unités Astronomiques et P en années. a est mesuré en secondes d'arc ; pour l'exprimer en Unités Astronomiques, il est nécessaire de connaître la parallaxe du système. C'est le seul moyen pour évaluer directement les masses stellaires, car si l'on connaît la position de G , ou la magnitude et le spectre de chaque composante, on peut déterminer chaque masse. Malheureusement, le petit nombre d'orbites sûres et de parallaxes sérieuses font que, par ce moyen, on ne connaît qu'un peu moins d'une centaine de masses.

Pour cette raison (méconnaissance des parallaxes faibles), Baize et Romani ont mis au point une détermination de la distance pour les couples inaccessibles à la méthode trigonométrique : les parallaxes dynamiques. Basée sur la relation masse-luminosité, elle permet, en connaissant P , a , les magnitudes, les spectres, de calculer la distance grâce à une formule.

Actuellement, ces calculs se basent sur quelques centaines d'orbites définitives : il faut que le compagnon ait pratiquement bouclé sa boucle, que les mesures soient assez nombreuses et suffisamment précises. On les appelle orbites définitives. Elles sont souvent précédées par des orbites préalables, voire intermédiaires. Un couple peut être représenté ainsi par quatre ou cinq orbites successives. Elles sont utilisables dès que a et P ne varient pratiquement plus. Grâce aux découvertes de couples récents dont une partie non négligeable possède des périodes courtes (de l'ordre de la décennie), le millier d'orbites actuellement recensé risque d'augmenter rapidement.

7.3 - CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES

Il s'agit, partant des éléments de l'orbite réelle, de retrouver les coordonnées polaires θ et ρ de la composante B par rapport à A . Ce calcul pourra être utile si l'on ne dispose pas de catalogue d'éphéméride et si l'on a à sa disposition les caractéristiques de l'orbite. On utilise les formules classiques de l'ellipse :

$$\tan(\theta - \omega) = \tan(v + \omega) \cdot \cos i \quad (I)$$

$$\rho = r \cos(v + \omega) / \cos(\theta - \omega) \quad (II)$$

$$M = n(t - T) \quad (III)$$

où t est l'époque choisie, v l'anomalie vraie, M l'anomalie moyenne, r le rayon vecteur, avec l'aide de la fameuse équation de Képler :

$$M = u - (180^\circ/\pi)e \sin u \quad (\text{en degrés}) \quad (IV)$$

où u s'appelle anomalie excentrique, et

$$r = a(1 - e)^2 / (1 + e \cos v) \quad (V)$$

Si l'on possède une calculatrice programmable, on peut procéder ainsi :

- 1 calcul de $M = 360^\circ \cdot (t - T) / P$;
- 2 calcul de u avec des itérations ;
- 3 calcul de v avec : $\tan v/2 = \sqrt{(1 + e)/(1 - e)} \cdot \tan u/2$
- 4 calcul de r avec l'équation (V) ;
- 5 calcul de θ et P avec les équations I et II.

Si l'outil possède des formules préprogrammées (coordonnées polaires), il peut alléger le travail. Le lecteur trouvera plus de détails dans le Catalogue de 2 500 étoiles doubles de J. Minois (déjà cité), dans les numéros 2 et 3 d'Observations et Travaux avec des exemples de programmation.

Ce calcul peut s'effectuer aussi avec des tables (voir *Astronomie Générale*, de Danjon, p. 432), grâce encore aux éléments de Thiele-Innes (A, B, F, G, C, H), souvent donnés maintenant et qui facilitent grandement le calcul (voir *l'Observation des Etoiles Doubles* de P. Couteau, p. 114 à 117).

7.4 - DÉTERMINATION D'UNE ORBITE

Là encore, de nombreuses méthodes existent : voir les livres de Danjon et Couteau déjà cités. Pour informer le lecteur, nous résumerons ici une méthode simple décrite par P. Baize dans le numéro de février 1984 de *l'Astronomie*.

Il faut d'abord rassembler les mesures du couple que l'on veut étudier (d'où l'intérêt d'un fichier), corriger éventuellement les observations θ de la précession (en leur retranchant la quantité $0,0056(t-t_0) \sin \alpha \cos \delta$) si elles s'étalent sur une longue période et si le couple possède une forte déclinaison, enfin effectuer des moyennes annuelles si les observations sont nombreuses.

Ensuite, on procède comme suit :

1) Tracer la courbe de θ en fonction de t à grande échelle (feuilles de canson quadrillé 5 x 5 ou de papier millimétré de 50 sur 65). Les sinuosités décrivent les variations de la vitesse du compagnon mais aussi la forme de l'orbite réelle : on pressent l'excentricité.

2) Dessiner l'orbite apparente à grande échelle en plaçant les données θ et ρ par année à l'aide de la règle et du rapporteur. Tracer l'ellipse avec le fil et les deux aiguilles en respectant la loi des aires : diviser l'ellipse en secteurs égaux en temps ; ils doivent avoir la même aire : on le vérifie en utilisant un planimètre, ou des secteurs de carton épais bien homogène que l'on pèse avec précision. Sa réussite est décisive pour la réussite finale.

Les foyers de cette orbite parente sont notés F' et AF'' ; son centre C coïncide avec celui de l'orbite réelle (voir figure XII.33) ;

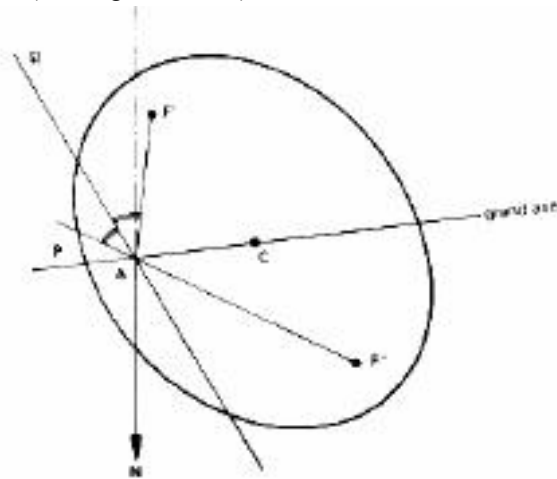


Figure XII.33 - Tracé sur une orbite apparente pour déterminer e et Ω de l'orbite réelle.

3) Déterminer l'orbite réelle : A est l'un des foyers ; le grand axe passe par le centre C , d'où la position du périastre P ; la ligne des nœuds est la bissectrice extérieure de l'angle $F'AF''$.

4) On mesure au rapporteur les angles de position de P , ω ; avec la règle, l'excentricité $e = CA/CP$.

5) La période P se cherche sur l'orbite apparente si elle n'est pas bouclée par la mesure des aires :

$P = S/c$ (S : surface totale ; c : constante des aires, $C = dS/dt$ où dS est l'aire balayée pendant l'intervalle de temps dt) ; si elle est bouclée, on peut la lire sur la courbe $\theta(t)$, de même que T , date de passage au périastre.

6) Ayant déjà P , T , e , ω , il reste à calculer Ω à l'aide de l'équation (I) (quand $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ou 270° , alors $v + \omega = \theta - \Omega$), puis i car au périastre : $\cos i = \tan(\theta - \Omega) / \tan \omega$, et enfin a grâce à (V).

En utilisant les valeurs établies pour l'orbite, on calcule pour les données qui ont servi à tracer l'orbite les résidus $\theta - C$. Ils doivent se distribuer aléatoirement et ne pas tous aller dans le même sens, sinon il faut retoucher les valeurs de l'orbite pour améliorer les résidus.

Une méthode complètement informatique a été mise au point par E. Soulié (Astronomy and Astrophysics, n° 164 de 1986) pour faire ce travail d'optimisation.

<p>2 orbites vues par la tranche :</p> <p>STF 1728 - ADS 8804 13h10,0 N17°31 (2000) 5,2-5,2 En 1987 : $\theta=192^\circ$; $\rho=0,42''$ En 1990 : $\rho=0,04''$! En 1992: $\theta=12^\circ$; $\rho=0,5''$ Orbite : Harting 1950 P:25a T:1911,7 e:0,57 a:0,68" i:89,7° ω:277,7° :11,9°</p>	<p>STF 1909 - ADS 9494 - 44 Boo 15h03,9 N47°39 (2000) 5,3-6,2 En 1987: $\theta=44,5^\circ$; $\rho=1,4''$ En 1990 : $\theta=47^\circ$; $\rho=1,7''$ Orbite : Heintz 1978 P:225,0 T:2021 e:0,43 a:3,77" i:83,9° ω:38,8° :57,8°</p>
<p>2 orbites vues de face</p> <p>STF 1196 - ADS 6650AB - Cnc 08h12,2 N17°40 (2000) 5,6-6,0 triple En 1987 : $\theta=21,8^\circ$; $\rho=0,6''$ En 1990 : $\theta=182^\circ$; $\rho=0,6''$ Orbite : Gasteyer 1951 P:59,7 T:1930 e:0,32 a:0,88" i:172° ω:233° :58°</p>	<p>STF 1338 - ADS 7307 AB 09h21,2 N38°12 (2000) 6,6-6,8 En 1987: $\theta=267^\circ$; $\rho=1,1''$ En 1990 : $\theta=219^\circ$; $\rho=1,0''$ Orbite : Arend 1953 P:389,05 T:1998,59 e:0,29 a:1,52" i:15,8° ω:258,9° :28,1°</p>

Tableau XII.7 - Exemples d'orbites.

7.5 - DÉTERMINATION DE TRAJECTOIRES RECTILIGNES

Il s'agit d'établir l'opticité des couples étudiés. En somme, on en revient à l'intérêt premier porté aux étoiles doubles, en particulier par William Herschel pour la détermination des parallaxes stellaires. Nous verrons plus loin que c'est bien, justement, le but de cette démarche.

Ce type de recherche est peu pratiqué. Il est pourtant plus simple à traiter que le cas d'une orbitale. En effet, ici, il suffit de faire passer une droite dans un nuage de points et de vérifier que la vitesse est constante, une fois que l'on a de bonnes certitudes sur l'opticité du couple (voir figure X11.34). Mais attention au risque de traiter le cas d'une orbitale, vue quasiment dans le plan de révolution, sur une partie de l'orbite entre le périastre et l'apoastre.

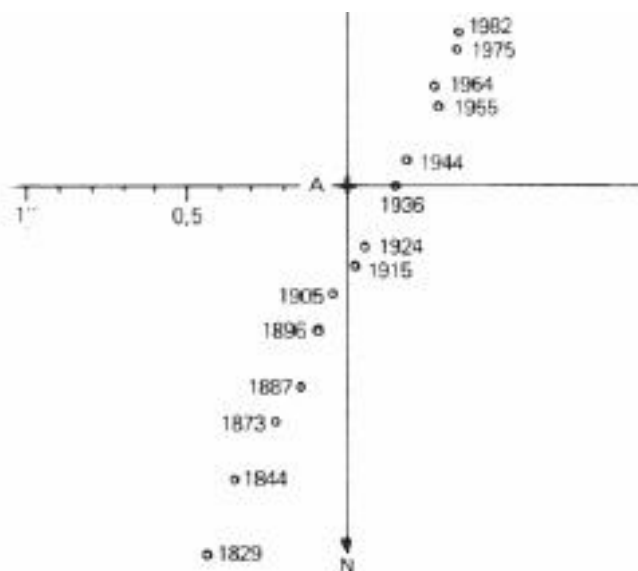


Figure XII.34 - Mouvement rectiligne et uniforme du compagnon de ADS 8231 (STF 1555) : couple optique.

Lorsque l'on mesure les valeurs relatives θ et ρ , à chaque observation, on opère toujours dans le même petit secteur céleste, ce qui dispense des réductions de l'aberration due à la réfraction, ainsi que l'aberration annuelle, d'autant qu'en général, les observations se répartissent sur toutes les périodes de l'année. En outre, elle est de l'ordre de l'incertitude sur chaque mesure. Par contre, sur une longue période d'étude, et près du pôle, il serait prudent de corriger les mesures de θ de la valeur de la précession : $-0,0056^\circ \sin\alpha/\cos\delta (t-t_0)$.

Actuellement, il n'existe qu'un catalogue de trajectoires rectilignes, celui de J. Dommanget (1964), auquel nous faisons ici largement référence. Il contient 325 entrées (à comparer aux 536 orbites calculées à la même époque). Actuellement, autour de 500 cas ont été étudiés (contre environ 1 000 orbites calculées). Récemment (1977), P. Muller y a contribué pour 17 objets. Ou ce type d'investigations intéresse moins les chercheurs, ou statistiquement les orbitales sont deux fois plus nombreuses que les couples optiques...

Examinons les aspects géométriques de cette question. Si les éléments naturels, exprimés en coordonnées polaires, sont plus parlants, comparés aux observations en indiquant les θ et ρ du rapprochement minimum, ainsi que le mouvement annuel relatif de la composante, les éléments vectoriels, en coordonnées rectangulaires, se prêtent mieux pour une transformation ultérieure, en un calcul du mouvement propre μ . L'on peut toujours revenir aux coordonnées équatoriales avec : $\alpha = \mu x/\cos\delta$ et $\delta = \mu y$.

Comment procéder ? Plutôt que d'entrer les données dans un programme, données sur lesquelles on ne pourra plus s'interroger, il est préférable de porter chaque mesure sur une grande feuille, en notant la date et l'auteur de la mesure. On peut alors tracer la droite (ou la calculer à l'aide de toute méthode de régression linéaire). L'avantage du dessin, c'est que l'on peut prendre en compte toutes les données, immédiatement, et au besoin donner un poids à l'une ou l'autre (par exemple, des mesures photo en provenance de Washington). L'établissement de α et δ reste une chose aisée.

Orbitale ou optique ? La constance de la vitesse doit déjà renseigner. Pour être plus précis, J. Dommanget a mis au point des critères d'opticité. Le premier est un critère dynamique. Il s'agit de rechercher une valeur π_1 limite pour la parallaxe du couple, en s'aidant de la relation masse-luminosité déterminée par P. Baize, pour que les mesures observées correspondent encore à un mouvement elliptique. La formule (voir le Catalogue de trajectoires rectilignes, Annales de l'observatoire de Belgique, 3ème série T.IX Fas 6, de J. Dommanget) est d'un emploi peu commode si l'on n'a pas accès à des catalogues spécialisés (magnitudes, classes spectrales, parallaxes). Par contre, l'autre critère est d'ordre statistique, établi grâce au critère dynamique. C'est la relation : $\log(\rho va^2) = +0,39 - 0,207 m_{AB}$ ou V_a est la vitesse annuelle, ρ la séparation, m_{AB} la magnitude globale du couple. Tracée, la droite représentant cette relation dégage deux demi-plans, l'un au-dessous ou un mouvement orbital est possible, l'autre au-dessus où ce n'est plus possible, assurant l'opticité du couple. En outre le m du couple est une bonne indication d'opticité s'il est grand, et s'il n'y a ni naine blanche ni naine rouge dans l'affaire. On voit aussi qu'une grande vitesse annuelle et une grande séparation sont de bons indices (voir figure XII.35).

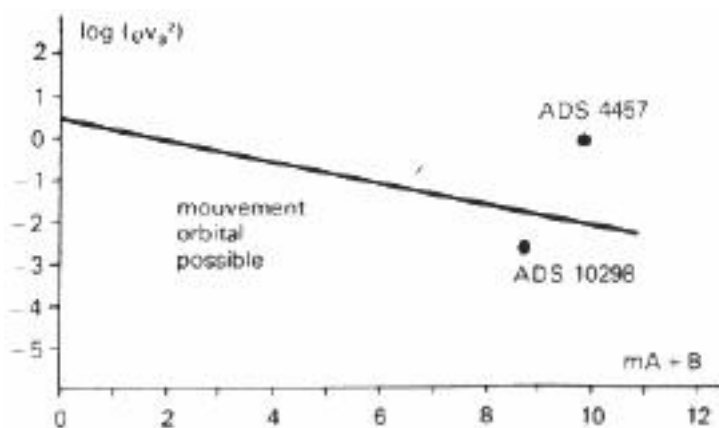


Figure XII.35 - Graphique permettant de vérifier l'opticité d'un couple.

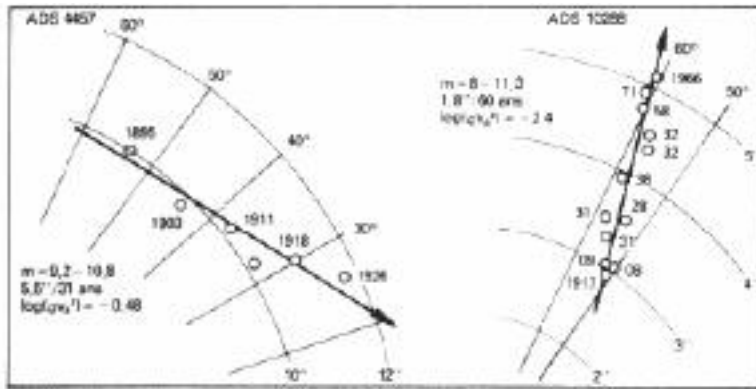


Figure XII.36 - Deux exemples de trajectoire rectiligne relative, pour lesquelles un critère d'opacité a été calculé.

Pour présenter le travail, il faut donner une identification complète du couple, les magnitudes, le calcul de α et δ en donnant l'origine de t_0 (en général 1950). On fait alors apparaître les résidus 0 - C par rapport aux mesures utilisées. Grâce aux catalogues (S.A.O., C.D.S. ou A.D.S., A.G.K.3), on peut donner les mouvements propres calculés pour l'une ou les deux composantes en ajoutant les remarques éventuelles : précision ou confirmation de μ (voir la publication de Paul Muller, Mouvements relatifs de 17 étoiles doubles visuelles, Astronomy and Astrophysics, supply 32, 165-172, et celle de G. de Froment sur A.D.S. 8231, l'Astronomie, février 1987).

On voit bien que ce type d'investigation n'est pas très couru actuellement. Il y a place pour l'activité des amateurs, à condition qu'ils puissent avoir accès à un fichier de mesures régulièrement tenu. De plus, les observateurs, grâce au programmes de couples négligés, auront certainement des éléments de première main pour apporter leur contribution à cette question.

7.6 - LA PLACE DES ASTRONOMES AMATEURS DANS LE DOMAINE DES ÉTOILES DOUBLES

Dégagé des soucis de carrière, des contraintes inévitables des établissements s'occupant de recherche astronomique, libre de ses recherches, l'amateur est capable d'investir une grande partie de ses loisirs, de sa compétence (voire de s'en créer une) dans le sujet qui l'intéresse. C'est pour cela qu'il peut prendre une grande place dans des domaines comme l'astronomie des étoiles doubles et effectuer un travail utile à la communauté scientifique.

Il ne peut pas tout faire. Toutes les recherches nécessitant des synthèses, la compilation de nombreux documents, ne sont guère à sa portée. Cette frontière commence autour du calcul d'orbites pour lequel il faut réunir des quantités de mesures dont seuls disposent les professionnels. Une exception pourtant : le Dr Paul Baize dont nous avons déjà parlé. Les statistiques diverses sur les populations d'étoiles se trouvent au-delà de cette frontière, nécessitant le traitement de trop nombreuses données.

Par contre, au moment où les observateurs professionnels d'étoiles doubles se réduisent, l'amateur dispose de tout le champ de plus en plus inculte des mesures. Certains professionnels craignent même qu'après leur départ, les amateurs soient les seuls à porter le lourd fardeau de la continuité. Alors, la pérennité ne pourra s'assurer qu'au sein d'associations s'intéressant à notre domaine, telles qu'il en existe actuellement. Mieux que la concurrence avec les professionnels, il choisira la collaboration, le travail en équipe, pour porter ses efforts là où les besoins se feront sentir, proposant éventuellement des idées de programmes quand ses observations le lui suggéreront, utilisant les instruments d'observatoires (ses moyens instrumentaux sont nécessairement limités).

Cette collaboration existe déjà dans divers secteurs, dans celui des étoiles doubles en particulier : vérification d'identifications pour Hipparcos, possibilité d'observer à Nice, à Bordeaux, à Paris, dans le cadre des programmes de la Commission des Étoiles Doubles de la S.A.F.