Les étoiles: distances, vitesses et masses

Alain Brémond

I – La mesure des distances.

Rappels sur les distances

Unité Astronomique (U.A.) : distance moyenne de la Terre au Soleil : 1,496 10^{11} m
Année lumière: distance parcourue par la lumière en une année : 9,46 10^{15} m
Parsec: distance depuis laquelle le rayon terrestre est vu sous un angle de une seconde : 3,086 10^{16} m ou 3,26 a.l. ou encore 206 265 U.A.
La définition par l'Union Astronomique Internationale (1973) de l'unité astronomique est la suivante : Demi-grand axe d'une orbite que décrirait autour du Soleil une planète de masse négligeable, non perturbée, dont le moyen mouvement est égal à k radians par jour, k étant la constante de Gauss, les unités de temps et de masse étant :
K=0,985 607 668 601 425 degrés / jour
Unité de temps : le jour, égal à 86 400 secondes du Système International.
Unité de masse : la masse du Soleil : 1,988 9 X 10^{30} kg (1992)
G constante de la gravitation universelle : 6,672 59 X 10^{11} m^3 kg^{-1} s^2
En 1992 I UA = 1,495 978 7061 X 10^{11} m

Mesures des distances des étoiles

Plusieurs méthodes : la mesure de la parallaxe annuelle

Le calcul du module de distance (vu avec G. Paturel)

La parallaxe annuelle

La mesure de parallaxe consiste à mesurer un objet par rapport à d'autres plus lointains en se déplaçant sur une base de longueur connue.
La terre, en se déplaçant en six mois environ sur la moitié de son orbite fournit une base de deux unités astronomiques.

Méthode de mesure.

On réalise des photographies du ciel où se trouve l'étoile à mesurer et des étoiles lointaines de référence. Ces photographies sont prises à six mois d'intervalle. Les plus proches se déplacent: on mesure ce déplacement après avoir déterminé l'échelle de la photographie en secondes d'arc (voir annexe 2).

Limites.

C'est la résolution spatiale des instruments qui limite la magnitude et donc la possibilité de mesure de la distance des étoiles avec une précision suffisante. Cette limite est augmentée grâce à des satellites comme *Hipparcos* et bientôt *Gaia*.

Depuis la Terre la limite est de 25 pc avec une précision de 10% mais 5 pc pour une précision plus grande.
Hipparcos : 100 pc à 0.002'' d'arc près et 500 pc avec une précision moindre.

Calculs
L'angle est mesuré dans un intervalle de six mois: la parallaxe est la moitié de cette distance.

Distance: $d = R / \varpi$

où R= rayon de l'orbite de la Terre et ϖ en radians

On rappelle :
α secondes X π /180*3600 = α radians, car 180° = π radians et 1° = 3600''

Exemple
En 1838, Bessel trouve que la parallaxe de 61 Cyg. Est de 0,31'' (ϖ)

0,31 en secondes = (0.31 * 3,1459) / (180 * 3600) = $1{,}5\ 10^{-6}$ rad

La distance de 61 Cyg. Est D= $1{,}5\ 10^{11}/1{,}5.10^{-6}$, soit 10^{17} m = $10^{17}/3{,}086\ 10^{16}$ = 3,2 parsecs = 10,5 a.l.

II- Vitesses des étoiles:

Les étoiles se déplacent au sein de la Galaxie. Globalement, elles orbitent autour de son centre. Par rapport au Soleil, elles ont des mouvements qui dépendent de leurs positions et distances par rapport à lui. Depuis la Terre on distingue leur mouvement propre et leur vitesse radiale.

1- Le mouvement propre est mesuré par la vitesse transverse observée sur le fond du ciel, perpendiculairement à l'axe de visée. On mesure ce mouvement propre en secondes par an. Pour le transformer en vitesse, il faut connaître la distance de l'étoile.
On mesure ce mouvement sur des photographies à échelles connues (voir annexe 2).

La vitesse transverse est donnée par:
$V_T = 4{,}74 * \mu / \varpi$

Exemples:
L'étoile la plus rapide, l'étoile de Barnard a un mouvement propre μ = 10,3'' par an,

ϖ =0.545'' et V_T = 89,6 $km.s^{-1}$

Pour Sirius: μ = 1,32'' par an, ϖ =0.37921'' et V_T = 19,5 $km.s^{-1}$
Le *SAO catalog* donne pour un grand nombre d'étoiles leurs caractéristiques comportant ces vitesses.

2- La vitesse radiale est la vitesse de l'étoile dans l'axe de visée.

Elle se mesure par spectroscopie (effet Doppler-Fizeau). Pour l'obtenir on n'a pas besoin de connaître la distance.

Principe:

Comparaison du spectre de l'étoile avec un spectre étalon et mesure du décalage spectral:

$\Delta\lambda = \lambda_{observé} - \lambda_{émis}$

Calcul:
$V_r \ / \ c = \Delta\lambda / \ \lambda_{émis}$

Où c est la vitesse de la lumière.

Il faut faire des corrections, notamment celle de la vitesse de la Terre.

III - Masse des étoiles

On mesure d'abord celle de certaines étoiles doubles puis celle d'autres étoiles par la relation masse/luminosité.

1- Les étoiles doubles

On distingue plusieurs sortes d'étoiles doubles :

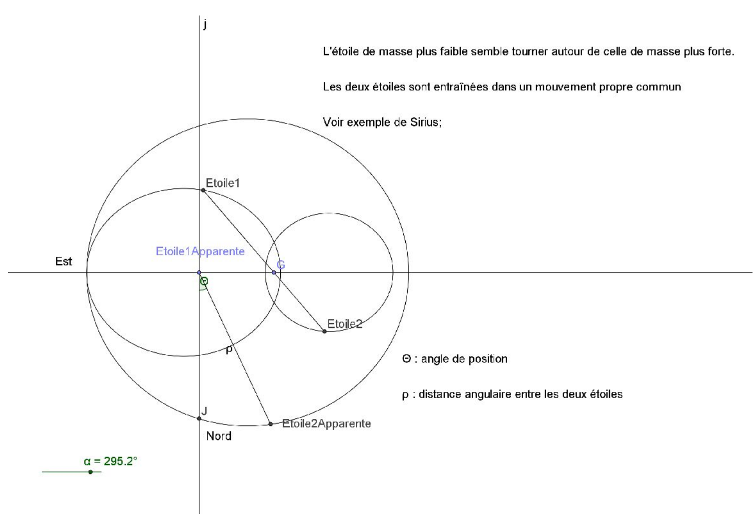
Visuelles : ce sont celles qui peuvent être observées par les astronomes amateurs. Elles sont visibles et séparables au télescope.

Astrométriques : non séparables mais mesurables par des modifications d'éclat
Spectroscopiques : non séparables mais mesurables par des décalages spectraux
A éclipses : cas particulier d'étoiles qui s'occultent mutuellement.

1.1. Principe du calcul de la masse des étoiles doubles visuelles.

Ce que l'on observe au cours du temps, c'est un angle de position θ et une distance angulaire ρ.

Ce que l'on calcule à partir de ces mesures répétées:
- La période de rotation P
- La plus grande distance A (l'orbite relative)



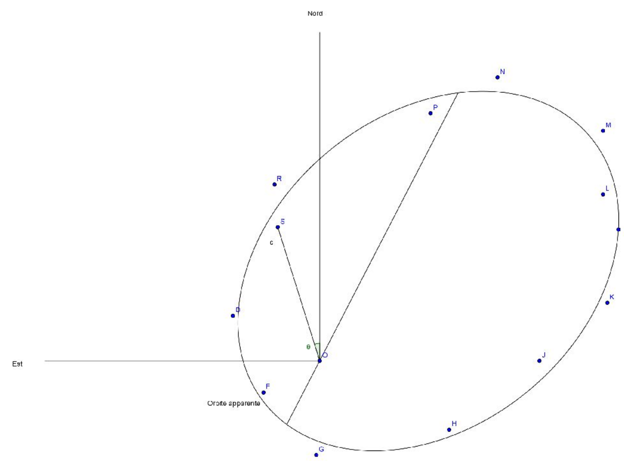
Exemple du mouvement général de Sirius et de son compagnon sur le fond du ciel et mouvement du centre de masse.

Les étoiles orbitent autour d’un centre de masse commun G. Au sol, ce que l’on observe c’est le mouvement d’une étoile par rapport à une autre, les angles θ et ρ.

On mesure sur le ciel, pour chaque position des étoiles, ces deux paramètres et on obtient l’orbite apparente.

Corrections:
Sauf dans le cas où les orbites sont dans un plan perpendiculaire à l’axe de visée, l’orbite est inclinée et ce que l’on voit c’est l’orbite projetée. On calcule d’abord l’angle d’inclinaison à partir de la forme de l’orbite (avec des logiciels spécialisés)

Il faut connaître la distance du système car les distances sont angulaires:
$A = d\ \rho$ (ρ en radians)



Calcul de la masse

On utilise la 3^e loi de Kepler revue par Newton:

La loi générale s’écrit : $a^3/T^2 = G/4\pi^2\ (M + m)$

On a dans le système double: $a_1M_1 = a_2M_2$
et $(a_1+a_2)^3 / T^2 = G/4i^2\ (M_1 + M_2)$ d’où on tire:

$M_1 / M_2 = a_2 / a_1$

$M_1 + M_2 = A^3 / P^2$

Où $G = 6{,}67\ 10^{-11}$ N.m².kg-² et A et P sont deux paramètres de l’orbite apparente de l’étoile 2 par rapport à l’étoile 1.

Exercice[1]:

Une étoile double est observée dans un plan perpendiculaire à l’axe de visée. La parallaxe = 0,1 secondes, la plus grande séparation angulaire entre les étoiles a été mesurée à 5 secondes et la

1 Les schémas suivants et cet exercice sont tirés du cours du CNED Astronomie et astrophysique.

plus petite de 1 seconde. La période de révolution est de 30 ans. Le compagnon est situé à une distance 5 fois plus grande que celle de l'étoile primaire. Calculer les masses de chaque étoile.

Solution :
L'orbite relative A= 5'' + 1'' = 6''. Le demi-grand axe= 3''.
La distance du système est de 0,1'' ce qui correspond à une distance de 10 parsecs (1'' correspond à 1 parsec et $d=1/\varpi$).
Une UA est vue à 0,1''depuis les étoiles. Si 1 UA est vue à 0,1'', 3'' correspondent à 30 UA. Le demi-grand axe est donc de 30 UA

On peut donc écrire:
$M_1 + M_2 = 30^3 / 30^2$ et $M_1 + M_2 = 30\ M_{sol}$. Dans la formule générale m est négligeable devant la masse Solaire M.

Le compagnon est 5 fois plus éloigné du centre de gravité que l'étoile principale, donc:

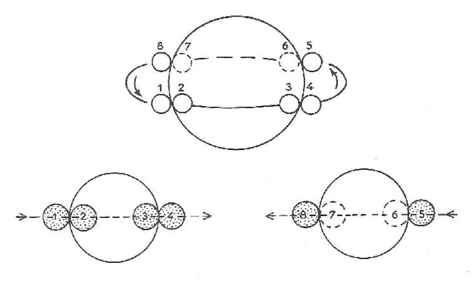
$M_1 / M_2 = 1 / 5$ d'où $M_1 = 5\ M_{sol}$

et $M_2 = 25\ M_{sol}$

1.2- Les étoiles doubles à éclipse, binaires photométriques et spectroscopiques

Dans le cas particulier où le plan des étoiles est voisin de 90°, il est dans le plan de visée.
Une étoile passe derrière puis devant l'autre. Elle n'est pas visible. La magnitude apparente varie périodiquement et la vitesse radiale de l'étoile principale aussi.

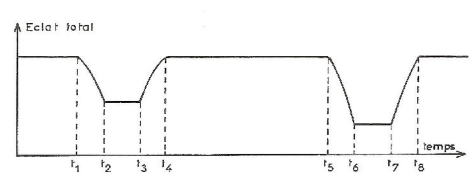
L'étoile secondaire passe alternativement devant et derrière l'étoile principale. L'éclat est maximum lorsque les deux étoiles sont séparées, il est plus faible lorsque l'étoile secondaire passe devant la principale et encore plus faible lorsqu'elle passe derrière.



Système binaires à éclipses avec orbite circulaire (i = 90°)

Une mesure de l'éclat avec une caméra CCD permet de tracer la courbe d'évolution de l'éclat et donc de mesurer la période du mouvement. A partir de la courbe on peut aussi déterminer le rapport des rayons de chacune des étoiles (voir annexe 1).

Avec ces deux paramètres, on peut calculer la masse de chaque étoile.

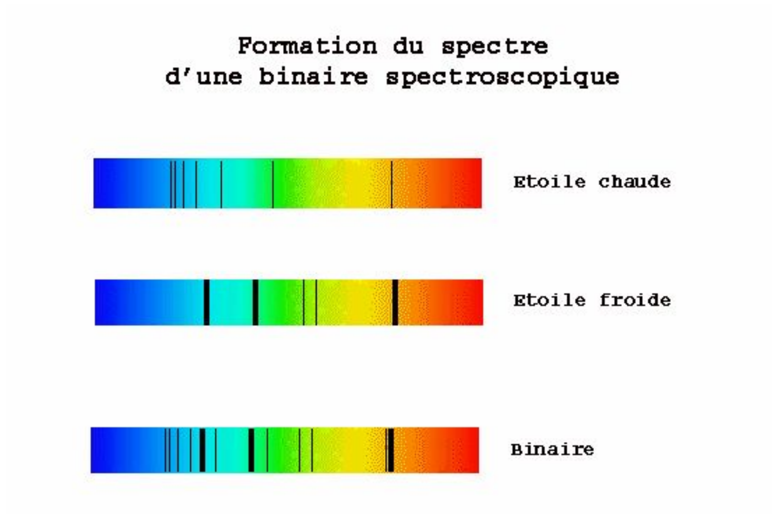


NB Dans ce type d'étoiles le compagnon est en général très proche de l'étoile principale.

Dans d'autres cas l'orbite relative est inclinée. On pourra donc avoir : une éclipse totale, une éclipse partielle ou pas d'éclipse du tout.

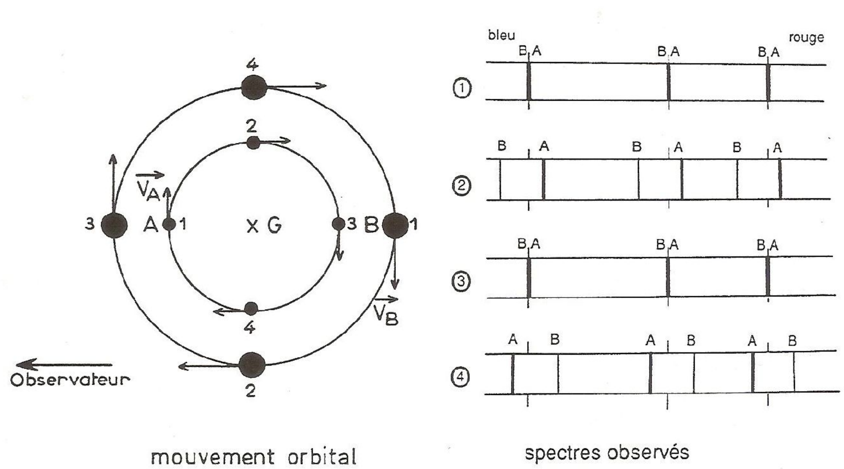
Binaires spectroscopiques.

Ces étoiles sont aussi des étoiles binaires spectroscopiques. Leurs spectres sont alors mélangés.



Le système est animé d'un mouvement d'ensemble qui s'applique à leur centre de gravité G et d'un mouvement à l'intérieur du système (étoiles A et B)[2].

On observe le mouvement de l'étoile B et de l'étoile Al lorsqu'elles sont en 1 et 3 il n'y a pas de décalage : le mouvement est tangentiel. Et les deux spectres sont identiques : les raies se superposent. En 2 les étoiles semblent se rapprocher et leurs spectres sont décalés vers le bleue ; en 4, elles s'éloignent et leurs raies sont décalées vers le rouge. Cependant, ces décalages ne sont pas identiques puisque leurs orbites par rapport à G ne sont pas les mêmes et donc leurs vitesses diffèrent et donc leur décalage spectral. Notez bien que sur la figure, l'observateur est à gauche.



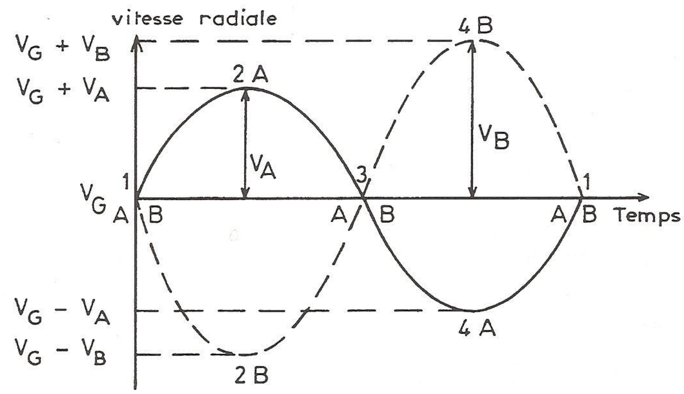
[2] Vue de l'observateur la petite étoile est vue comme tournant autour de la plus grosse.

De l'observation des spectres on peut tracer la courbe des vitesses radiales en fonction du temps de chacune des étoiles du système double par rapport à la vitesse de déplacement du centre de gravité (décalage par rapport à un système de référence immobile au laboratoire).

On en tire les masses par les formules suivantes :

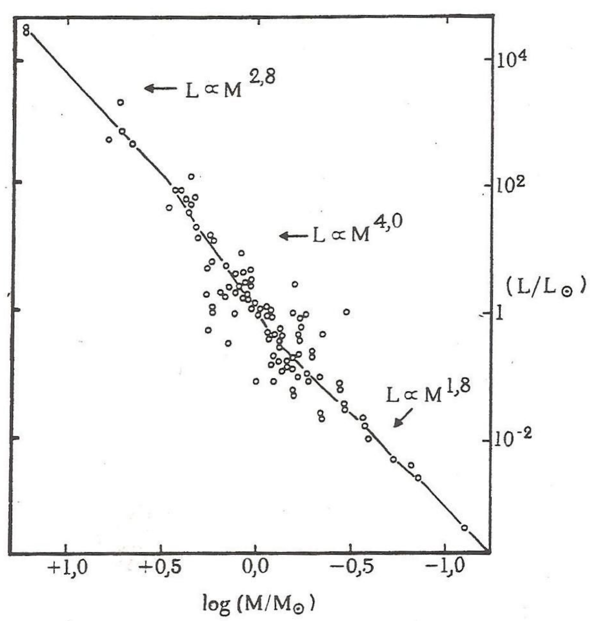
$M_A = V_B (V_A-V_B)^2 P/2 \pi G$

$M_B = V_A (V_A+V_B)^2 P/2 \pi G$



2- Relation masse luminosité

Pour certaines étoiles doubles on a pu mesurer leur masse, leur distance et leur éclat . Avec ces deux derniers paramètres on calcule la luminosité.
Il est alors possible de tracer la courbe qui relie log(masse) et log(luminosité): c'est une droite.
Pour des étoiles simples si on connaît leur distance et qu'on mesure l'éclat: on obtient leur masse.



Conclusion
L'observation de la lumière des étoiles permet de connaître:

L'énergie rayonnée et produite
La distance
Les vitesses
La masse.

D'autres paramètres seront tirés de la spectroscopie. Ils permettront de comprendre l'évolution des étoiles.

Annexe 1 : calcul des rapports des rayons des étoiles.
Soit R1 le rayon de la plus grande et R2 celui de la plus petite. Le schéma qui donne l'éclat en fonction du temps permet ce calcul.

Entre les positions 2 et 3, le **centre** de l'étoile parcourt le diamètre de l'étoile 1 mois deux fois son propre rayon et sa vitesse est v = 2R1 – 2R2 / (t3-t2) (1)

Entre les positions 1 et 4, ce centre parcourt le diamètre de l'étoile 1 plus deux fois son propre rayon et sa vitesse est v = 2R1 + 2R2 / (t4-t1) (2)

On note que les temps t2-t1 et t4-t3 sont égaux.

Avec les trois systèmes d'équation on peut former (2) – (1) :

2R1+2R2-2R1+2R2 = v(t4-t1-t3+t2) et en remplaçant t4-t3 par t2-t1 :

2R2 = v (t2-t1)

On a v = 2R1 + 2R2 / (t4-t1) d'où : 2R1 = v(t4-t1) –2R2 = v(t4-t1) – v(t2-t1=
Et 2R1 = v(t4-t2)

D'où : R1 / R2 = (t4-t2) / (t2-t1).

Annexe 2 : Etalonnage d'une photographie du ciel

Méthode 1 : il existe deux objets de distance connue : cas simple car il suffit de mesurer la distance sur la photo (en mm) d et la rapporter à la distance entre les objets en secondes d'arc s . l'échelle= d/s nombre de mm pour une seconde d'arc.

Méthode 2 : instrumentale. Elle nécessite de connaître les caractéristiques du télescope et du capteur.
Exemple pour un APN Cannon EOS 300D et un télescope Meade de focale= 2000 mm :

Le capteur mesure 22,7 X 15,1 mm. En pixels, en mode RAW, cela correspond à 3072 X 2048 pixels.

Le champ en secondes d'arc est donné par la formule :
C = 3438 X taille du capteur / focale

Dans notre cas, dans la longueur du capteur on a :
C= 3438 X 22.7 / 2000 = 38,9''

Soit une échelle de 22,7 / 38,9 = 0,58 mm et en pixels : 3072/38.9 = 79 px pour une seconde d'arc.

Les logiciels d'affichage des images (IRIS, Visual Spec) donnent la dimension en pixels de toute image affichée.

Annexe 3 : utilitaires.

Voir le site de la **SAF** et la Commission des étoiles doubles à http://saf.etoilesdoubles.free.fr/

Les logiciels gratuits indispensables :

IRIS

Reduc (Florent Losse): http://www.astrosurf.com/hfosaf/

Surface (Guy Morlet, Pierre Bacchus) : astroseb@wanadoo.fr

Les bases de données

Pour préparer les observations : http://doublestars.free.fr

Washington Double Star catalog : http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/wds
SIDONIe (Site Informatique Des étoiles DOubles de NIce) : http://sidonie.obs-nice.fr/
Centre de Données de l'observatoire de Strasbourg : http://cdsweb.u-strasbg.fr/

Base de données des Etoiles doubles et multiples de Besançon : http://bdb.obs-besancon.fr/Welcome_F.html

Annexe 4 : Quelques étoiles à éclipse intéressantes :

44 Bootis AD= 15h 03m 47s dec= 47° 39' 14'' ; période= 0.2678 jours, magnitude : 4.75 (5.8 – 6.4)

BW Draco P=0.292 j et m= 8.62

AB Andromedae P=0.3319 j m=9.03