



Des lycéens dans les étoiles... doubles

Marie-Claude Paskoff et 5 élèves
du lycée La Bruyère de Versailles

L'opération "Lycée de Nuit" lancée et suivie par l'ANSTJ pendant l'année scolaire 1997-1998 a donné l'occasion à un groupe d'élèves du lycée La Bruyère, à Versailles, de réaliser un véritable projet d'astronomie... Le thème retenu était :

"Étoiles doubles, vraies ou fausses?"

Il s'agissait en effet de différencier les couples formés d'étoiles liées gravitationnellement (qui sont de vraies étoiles doubles) des couples d'étoiles résultant d'un vrai effet d'optique. Pour cela, une démarche consiste à déterminer la distance à laquelle se trouve chacune des deux étoiles d'un couple : si les valeurs trouvées sont proches, on peut penser qu'il s'agit d'une véritable étoile double et réciproquement.

Bien entendu, ce projet n'avait pas la prétention de faire une découverte ! L'objectif était plutôt de mettre en œuvre et tester une méthode photométrique de mesure des distances, basée sur la notion d'indice de couleur.

Après un premier trimestre consacré à l'acquisition de notions théoriques (couleur et température des étoiles, classification des étoiles, diagramme H.R. etc...), le projet est entré en janvier 1998 dans sa phase de préparation active : apprentissage de la méthode photométrique à partir de documents, familiarisation avec la technique de la caméra CCD, recherche de documentation sur les étoiles doubles.

Enfin, c'est au cours d'un séjour à l'Observatoire de Haute Provence, du 16 au 20 avril 1998, qu'il a été possible de mener à bien l'étude de plusieurs systèmes d'étoiles doubles¹.

À l'observatoire nous avons pu disposer du télescope de 80 cm, équipé de sa caméra CCD, et un technicien nous a accompagné pendant toutes les nuits d'observation. Par chance, nous avons eu trois nuits avec un ciel parfaitement dégagé et avons pu alors travailler jusqu'au lever du jour.

Un compte-rendu du travail effectué a été rédigé par le groupe (cf. § 2).

En premier lieu je voudrais présenter la méthode de mesure des distances d'étoiles par photométrie utilisant l'indice de couleur (B-V). Cette méthode est maintenant pratiquée avec une caméra CCD mais, à l'origine, elle l'était par photographies. Le principe demeure le même.

1 - Mesurer la distance d'une étoile en la photographiant... c'est possible !

1.1 - Rappel de quelques notions théoriques.

L'éclat observé E d'une étoile est lié à sa luminosité intrinsèque L et à sa distance d à l'observateur. En effet, la puissance rayonnée par une étoile se distribue sur une surface sphérique de rayon d et par suite, $L = 4\pi d^2 \times E$.

- La magnitude apparente visuelle m_V d'une étoile est une mesure de son éclat. La relation de définition est :
 $m_V = -2,5 \log E + \text{cte}$. Ainsi, plus l'étoile est brillante, plus m_V est petite.

- La magnitude absolue M d'une étoile est égale à la magnitude apparente qu'elle aurait si elle se trouvait à la distance conventionnelle de 10 parsecs (1 parsec = 3,26 années de lumière).

Par suite, une relation utile est : $m - M = 5 \log d - 5$ où d est la distance de l'étoile, exprimée en parsecs.

Ainsi, connaissant m_V et M pour une étoile, on peut calculer sa distance d .

Pour déterminer la magnitude d'une étoile X , on procède par comparaison avec des étoiles voisines de l'étoile X et dont les caractéristiques sont déjà connues (catalogue d'étoiles). Ces étoiles serviront de référence et permettront de faire un étalonnage.

1.2 - Magnitudes et photographies.

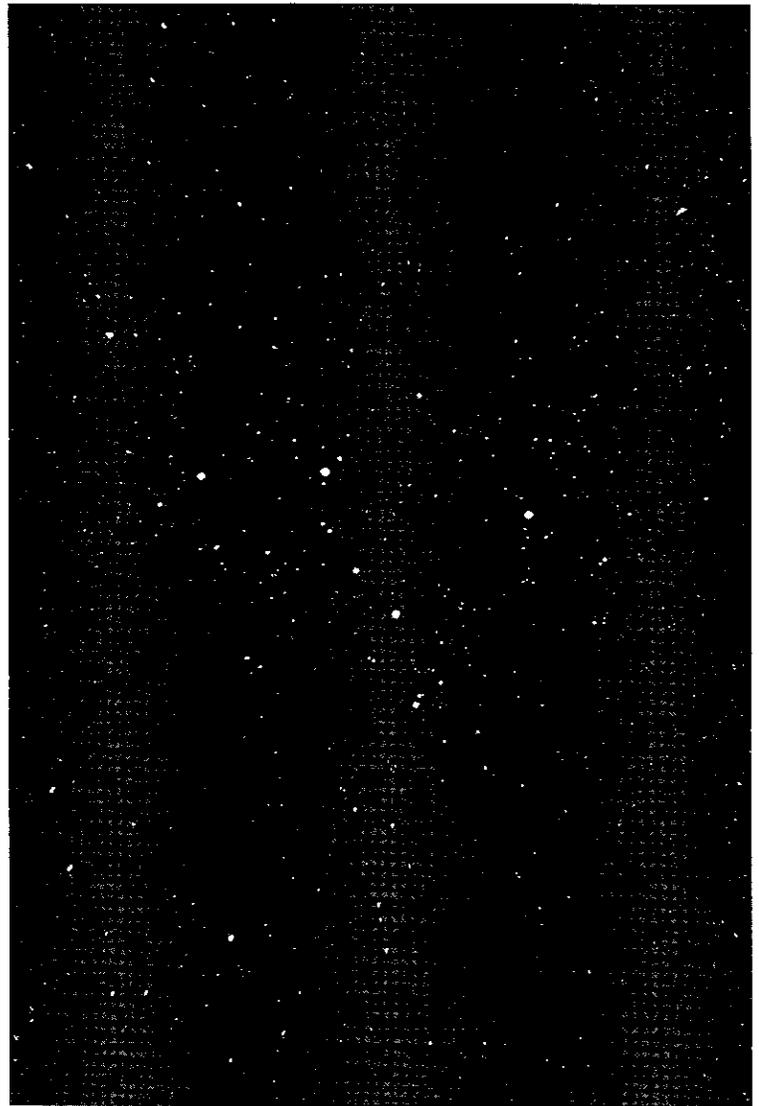
L'œil étant un mauvais instrument pour mesurer l'éclat des étoiles, on peut utiliser la photographie. Mais une pellicule photographique (noir et blanc) n'a pas la même sensibilité que l'œil. Cependant, en plaçant un filtre vert ($\lambda \approx 550 \text{ nm}$) devant l'objectif, on a un résultat équivalent au visuel. On appelle V la magnitude ainsi obtenue, telle que $V = m_V$. On peut placer aussi d'autres filtres, et on obtiendra de même une magnitude B (bleu), R (rouge), U (ultraviolet), etc. ...

Pour obtenir un cliché exploitable, il faut poser un certain temps (plusieurs minutes) et donc avoir un bon dispositif de suivi ; l'appareil photographique peut être installé en parallèle sur un petit télescope motorisé et l'œil rivé à un oculaire réticulé assure le suivi.

On obtient ainsi un document où les différentes étoiles apparaissent comme des taches circulaires de taille différente (cf. fig.1 ci-contre).

On admettra que la tache obtenue sur la pellicule (ou sur l'écran de projection) pour une étoile est proportionnelle à la quantité de lumière reçue de cette étoile : plus la tache est grosse, plus la magnitude est petite ; et inversement.

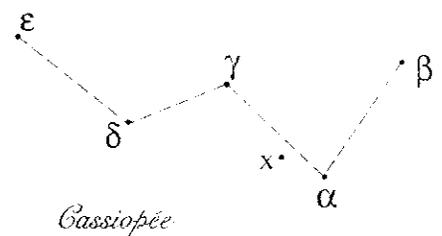
Figure 1



1.3 - Un exemple de détermination de m_V .

Le document reproduit (fig. 1) est un cliché de la constellation de Cassiopée, effectué avec un filtre vert (Wratten n°58). Il a été réalisé par Marie-Claude Paskoff lors d'un stage ANSTJ, en septembre 1997. L'appareil photographique était équipé d'un objectif de 50 mm, la pellicule Tmax 400, le temps de pose de 10 min. Les étoiles de référence sont α , β , γ , δ , ϵ . L'étoile de magnitude inconnue X , est située entre α et γ (fig.2).

Figure 2



Le tableau et le graphe ci-contre (fig.3) montrent la détermination de $m_V(X)$, par corrélation linéaire. Les valeurs des diamètres (\varnothing) des taches stellaires ont été obtenues en projetant le négatif sur un écran et en mesurant avec une simple règle graduée, à 0,5 mm près. Les valeurs de V pour les étoiles de référence ont été relevées dans le Sky Catalogue 2000. Le diamètre mesuré pour l'étoile X étant 4,5 mm, la valeur trouvée graphiquement pour $m_V(X)$ est : 3,2 mm. La valeur obtenue dans le catalogue pour cette même étoile est : 3,45. Le résultat obtenu est donc acceptable à 7% près.

1.4 - Magnitude absolue et indice de couleur

La magnitude absolue, M, d'une étoile est fonction de sa luminosité L. La relation est, comme vu précédemment :

$$M = - 2,5 \log L + \text{cte.}$$

Plus l'étoile est lumineuse, plus M est petit.

La luminosité d'une étoile dépend de sa température de surface et sa couleur dépend aussi de cette température. Une étoile bleue est beaucoup plus chaude ($\approx 10\ 000\ \text{K}$) qu'une étoile rouge ($\approx 3\ 000\ \text{K}$).

L'indice de couleur (B - V), différence entre les magnitudes apparentes obtenues avec des filtres B et V, renseigne sur la couleur de l'étoile. Si (B - V) > 0, l'étoile est jaune ou rouge. Si (B - V) < 0, l'étoile est plutôt bleue.

Par ailleurs, la température externe d'une étoile est un indicateur de son stade d'évolution et permet de la situer dans le diagramme H.R. de classification des étoiles. Ce diagramme fait donc apparaître la corrélation entre l'indice de couleur d'une étoile de classe connue avec sa magnitude absolue. Ainsi que le montre le croquis ci-contre (fig.4), très schématisé, si on connaît la classe d'une étoile (qui est liée à son spectre) et si on connaît son indice de couleur, on peut connaître sa magnitude M.

En théorie, il suffit donc de déterminer successivement les magnitudes V et B d'une étoile pour connaître son indice de couleur (B - V) et en déduire sa magnitude absolue. En réalité, cette méthode ne peut être que très approximative car les sources d'erreur sont nombreuses.

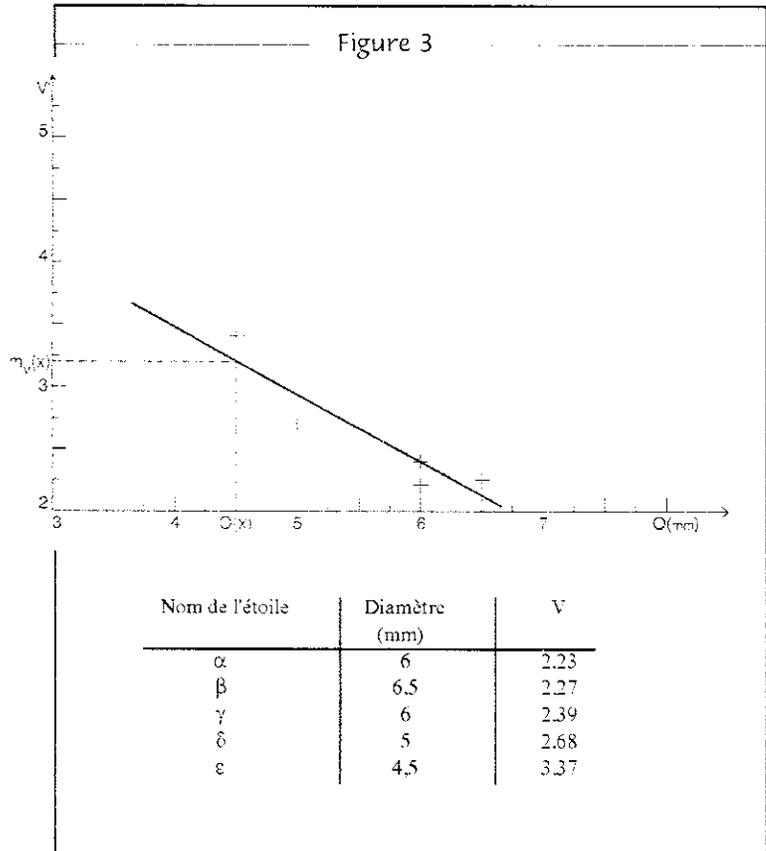
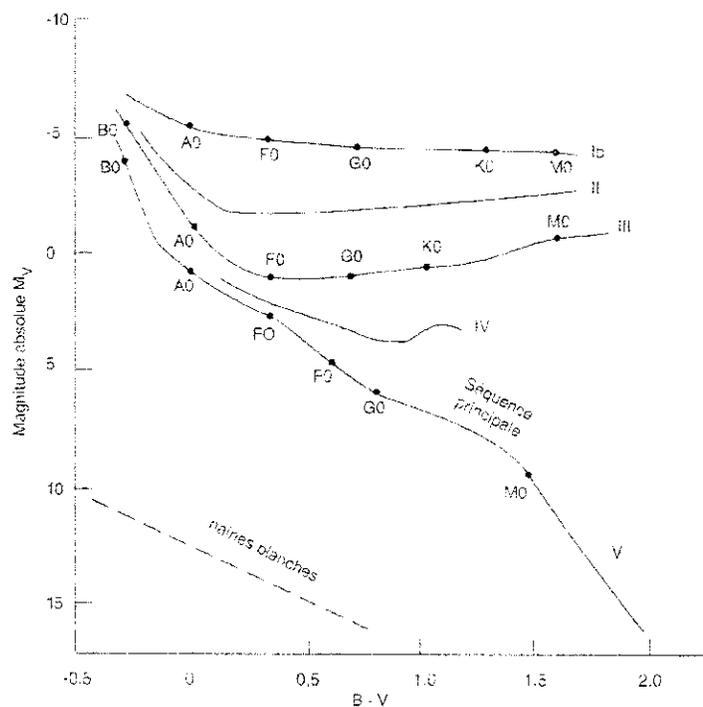


fig.4 : diagramme H.R.



2 - Étoiles doubles : vraies ou fausses ?

L'étude entreprise sur des couples d'étoiles a pour objectif de différencier les couples d'étoiles liées gravitationnellement (qui sont de vraies étoiles doubles), des couples qui résultent d'un effet d'optique. Pour cela, il convient de déterminer à quelle distance se trouve chacune des deux étoiles formant la double.

La méthode de mesure des distances utilisée est la méthode photométrique basée sur l'indice de couleur (B - V). Elle est appliquée à des images obtenues par une caméra CCD installée sur un télescope de 80 cm. Le logiciel d'analyse des images est "Prism", fourni par l'ANSTJ.

2.1 - Démarche expérimentale.

Les différentes étapes sont :

• **Sélection de l'étoile double**, à partir des critères suivants :

- séparation des composantes : comprises entre 16" et 30", étant donnée la dimension du capteur et la nécessité d'avoir deux étoiles bien séparées ;
- magnitude (V) de celles-ci supérieure à 6 afin d'éviter la saturation des images sur le capteur (seuil de lumière à ne pas dépasser) ;
- localisation dans le ciel, en fonction de la date et de l'heure d'observation : dans les constellations Grande Ourse et Lion.

• **Sélection d'étoiles de référence**, qui permettront d'effectuer un étalonnage ; il faut au minimum trois étoiles qui doivent :

- se situer sensiblement à la même hauteur que l'étoile double, en raison de l'absorption atmosphérique ;
- avoir une magnitude (V) voisine de celle des composantes de la double ;
- être répertoriées dans le catalogue U.B.V. (Merrilliod) afin de connaître d'une part V et d'autre part leur indice de couleur (B - V), ce qui permettra d'en déduire B.

• **Acquisition des images avec la CCD** : on réalise successivement des prises d'images de l'étoile double et des étoiles de référence, avec un filtre vert ($\lambda = 550$ nm) puis avec un filtre bleu ($\lambda = 450$ nm), en adaptant le temps de pose (de 1 à 90 s).

• **Traitement des images** : en utilisant les offset et les flat, on débarrasse les images des biais (défauts) et l'on obtient pour chacune une valeur du flux reçu.

- offset : permet d'éliminer les défauts d'une image liés aux imperfections de la caméra CCD ; on fait une prise d'image à obturateur fermé. Les informations obtenues sont ensuite retranchées à l'image de l'étoile ;

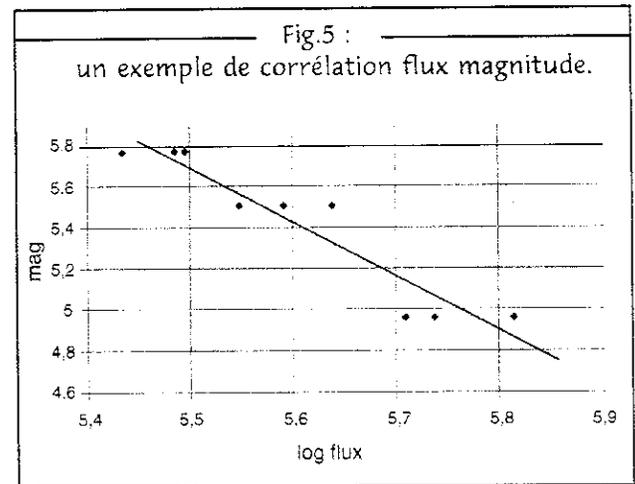
- flat : permet de corriger les défauts dus à l'hétérogénéité de réponse du capteur. ; on fait une prise d'image d'un écran uniformément clair (par exemple une portion du ciel au lever du jour).

Les informations obtenues sont traitées puis réinjectées à l'image.

• **Détermination des magnitudes (V) et (B)** : on établit, grâce aux étoiles de référence, une relation linéaire entre le logarithme du flux par seconde et la magnitude (V) ou (B).

Le graphique ci-dessous (fig. 5) montre un exemple de corrélation ; on remarquera que, pour chacune des trois étoiles de référence, on a utilisé trois prises d'image avec le même temps de pose.

On en déduit la valeur de (V) et de (B) pour chacune des deux étoiles du couple étudié. Par suite, on connaît l'indice de couleur (B - V) pour les deux composantes de l'étoile double.



• **Détermination de la magnitude absolue M** : à l'aide du diagramme H.R. (indices (B - V) en abscisse, M en ordonnée), on obtient M pour chacune des étoiles du couple.

• **Calcul des distances** : à l'aide de la formule $m - M = 5 \log d - 5$ (où $m = V$) on obtient la distance d en parsecs.

2.2- Résultats obtenus.

Initialement, il était prévu d'étudier 8 étoiles doubles, sélectionnées dans la "Revue des constellations" de la Société Astronomique de France et identifiées par la lettre Σ .

On a réalisé plus de 200 acquisitions d'images et, finalement, on a retenu les valeurs pour 4 étoiles doubles seulement.

Les résultats sont indiqués dans le tableau de la page ci-contre : l'identification de chaque étoile double a été précisée selon la classification du catalogue Hipparcos récemment publié (cf. CC81 p. 40).

A titre indicatif, on a reproduit dans la dernière colonne du tableau les valeurs des distances données dans ce même catalogue.

Nom de l'étoile double	D ₁ (en pc)	D ₂ (en pc)	références Hipparcos
Σ1315 HIC 45206-45208	211	254	D ₁ = 101 pc D ₂ = 126 pc
Σ1321 HIC 45343-120005	6.1	6.3	D ₁ = 6.2 pc D ₂ = 6.3 pc
Σ1415 HIC 50433-50435	90	47	D ₁ = 93.5 pc D ₂ = 64.1 pc
Σ1540 HIC 55846-55848	38	81	D ₁ = 17.6 pc D ₂ = 18 pc

Pour Σ1540 l'expérience est médiocre (saturation)

2.3 - Commentaires et critiques

- Pour le pointage, il faut connaître les coordonnées actuelles des étoiles tandis que, dans le catalogue Merilliod (catalogue of mean UBV data on stars), les coordonnées sont données pour l'année 1950. Une correction est donc nécessaire. De plus, les informations recueillies dans les différents catalogues consultés présentent souvent quelques différences (par exemple la valeur de V).

- Le nombre d'étoiles de référence, trois, utilisées pour établir la corrélation entre le flux et la magnitude est à peine suffisant.

- Dans certains cas, en raison de la trop faible magnitude (trop de lumière) il y a eu peut-être saturation du capteur.

- Les temps de pose utilisés étaient parfois faibles (1 à 2 s). Dans ces cas, les temps d'ouverture et de fermeture de l'obturateur ne sont pas négligeables et sont la cause d'une certaine erreur sur la valeur du flux capté.

- Par ailleurs, l'épaisseur de la séquence principale rend très imprécise la détermination de M ; c'est là sans doute la plus grande cause d'erreur : on a pu l'estimer, dans certains cas, à plusieurs dizaines de parsecs !

- Pour déterminer M avec le diagramme H.R, on a supposé que chaque étoile de la double appartenait à la séquence principale ; il aurait fallu pouvoir le vérifier en recherchant la classe spectrale de chaque étoile.

2.4 - Conclusions

Comme on vient de le voir, les résultats obtenus sont entachés d'une incertitude importante liée à la méthode suivie et aux conditions expérimentales. Cependant on peut conclure que :

- si les distances trouvées sont de valeur voisine (c'est le cas de Σ1321), il y a une forte probabilité pour que le couple soit une vraie double.

- si les distances trouvées sont très différentes (Σ1315, Σ1540 et Σ1415), on penchera pour une fausse double.

Il est intéressant, par ailleurs de comparer nos résultats aux valeurs des distances qui sont données dans le tout récent catalogue Hipparcos :

- pour Σ1321, l'accord est presque parfait.

- dans le cas de Σ1315, les valeurs du catalogue Hipparcos sont très différentes pour les deux composantes. Nous avons trouvé de même. Il s'agit donc certainement d'une fausse double. De plus on remarque que les rapports des distances sont du même ordre ($D_2 / D_1 \approx 1, 2$) ; cela pourrait peut-être signifier la présence de matière interstellaire qui produirait un effet d'extinction et nous ferait croire les étoiles beaucoup plus loin qu'elles ne sont.

- pour Σ1415, nos résultats sont du même ordre de grandeur et il s'agit très certainement d'une fausse double.

- pour Σ1540, nos résultats diffèrent notablement, et notre conclusion est mauvaise... Mais nous avons eu des difficultés à éviter la saturation des images d'où les mauvaises mesures.

En conclusion, la méthode photométrique permet une évaluation des distances mais, à elle seule, elle ne peut permettre d'apporter une réponse sûre à la question de la nature d'une étoile double. L'observation d'une variation périodique de la séparation des étoiles serait une confirmation qu'il s'agit d'une véritable double.

Comme toujours, en astrophysique, c'est la convergence d'observations de nature différente qui permet d'établir une conclusion fiable.

Note :

Le groupe était constitué de 5 élèves de 1^{ère} S (Clara Mouchara, Xavier Monty, Benoît Poyet) et de terminale S (Vanessa Beaufour et Allécor d'Eyssautier) et d'une enseignante (Marie-Claude Paskoff). La présence avec nous d'un suiveur ANSTJ (Pascal Levy) a été précieuse.

