









Quelle est la distance d'une étoile ?

Méthodes :	En déterminant l'indice de couleur et le diagramme HR	En déterminant la période de variation de céphéides par la méthode d'Argelander
Niveau scolaire :		
Difficulté technique :		
Durée de mise en place :		
Durée de réalisation de l'expérience et d'exploitation des résultats :		
Matériel nécessaire :	Atlas, filtres de couleur, appareil photo, éventuellement réseau et télescope Filtres et réseau disponibles sur le site du CLEA : http://www.ac-nice.fr/clea/DocTransp.html	Œil nu ou jumelles (de type 7x50 ou 10x50), atlas précis du ciel (ou logiciel de cartographie du ciel), montre

Mots - clés : couleur et température des étoiles, indice de couleur, filtres, période de variation, spectroscopie

Introduction :

Pour trouver la distance des étoiles, on ne peut pas aller « arpenter » directement (on ne peut pas y aller, elles sont trop loin). On pourrait, si elles sont relativement proches, constater leur déplacement par rapport à des étoiles beaucoup plus lointaines. C'est ce qu'on constate dans un train par exemple : les éléments du paysage les plus proches se déplacent beaucoup plus vite que le fond du paysage. Il se passe la même chose avec les étoiles : alors que la Terre se déplace autour du Soleil au cours d'une année, les étoiles les plus proches semblent se déplacer par rapport aux étoiles les plus lointaines. Cet effet est appelé parallaxe stellaire annuelle. Seulement le déplacement maximal, pour l'étoile la plus proche donc, est de l'ordre de $\frac{3}{4}$ de seconde d'arc. A titre de comparaison le diamètre apparent de la lune est de 30 secondes d'arc. Mesurer une parallaxe stellaire prend du temps (il faut des mesures séparées de plusieurs mois) et nécessite des observations précises. Cette méthode ne pourra pas être appliquée simplement pour les étoiles (contrairement aux planètes, cf. la fiche *distance des planètes*) mais peut faire l'objet d'un projet *Collège et Lycée de Nuit* !

Pour déterminer la distance des étoiles, on utilise leur lumière. C'est en particulier la différence entre la luminosité observée des étoiles (la magnitude apparente) et la lumière que nous savons qu'elles émettent (la magnitude absolue) qui nous renseignera sur leur distance. En effet, plus une étoile d'une certaine brillance est loin, plus elle est perçue faiblement.

Principe :

Les méthodes présentées ici utilisent des informations ne provenant que de l'étude de la lumière des étoiles. Nos connaissances sur les étoiles (à travers le diagramme Hertzsprung-Russel) nous permettent de mettre en relation leur couleur, leur température et la lumière qu'elles émettent. Pour une autre catégorie d'étoiles, des étoiles variables d'un certain type (appelées céphéides), nous pouvons mettre en relation la période de variation de ces étoiles et la quantité de

Arpenter l'Univers

lumière émise. Dans ces deux cas, c'est l'écart entre la lumière émise et la lumière perçue qui nous indiquera la distance de ces étoiles (loi de Pogson).

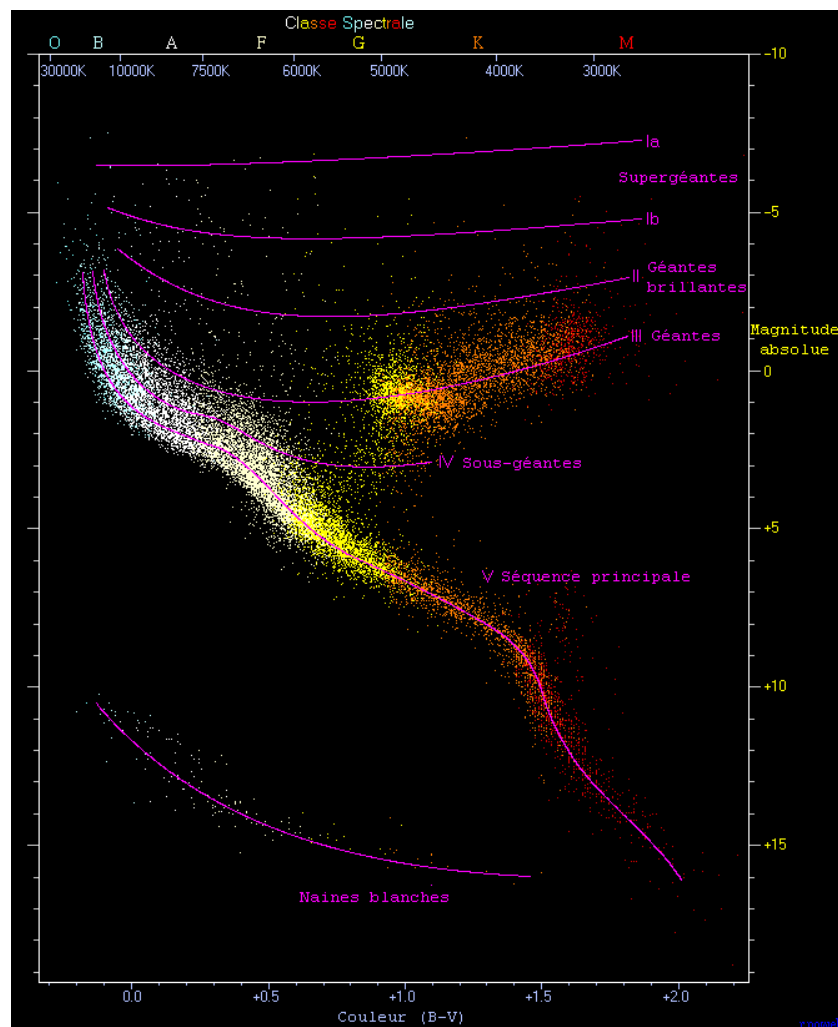
Dans la première méthode, il suffira de déterminer précisément la couleur de l'étoile et sa magnitude apparente, par des photos prises à travers différents filtres, ou bien par l'analyse spectroscopique de la lumière.

Dans la deuxième méthode, la relation période - luminosité des céphéides ne nécessite que de déterminer (à l'œil nu pour des étoiles brillantes, ou aux jumelles pour des plus faibles) la magnitude apparente des étoiles et leur période de variation (une montre suffit !).

Méthode 1 :

Trouver la distance d'une étoile en ne prenant que trois photos !

Pour déterminer la distance d'une étoile on va chercher à la placer sur le diagramme Hertzsprung - Russel (HR). Un tel diagramme indique la luminosité d'une étoile en fonction de son indice de couleur.



Crédits : Richard Powell, atunivers.free.fr

Une étoile émet de la lumière dans toutes les longueurs d'onde (toutes les couleurs), mais pas avec la même intensité dans chaque couleur. Plus l'étoile est chaude, plus elle émettra dans le bleu ; froide, dans le rouge.

Arpenter l'Univers

Conseil : Cette correspondance entre couleur et température est à l'opposée de l'expérience que nous avons de notre salle de bain. Pour se familiariser avec cette affirmation, on peut remarquer que la zone bleue d'une flamme d'un bec Bunsen est plus chaude que la jaune. De même, si on fait chauffer un métal, il va d'abord rougir, puis devenir jaune, et enfin blanc (ce qui correspond à l'effet de l'addition de l'émission de lumière bleue aux couleurs précédentes).

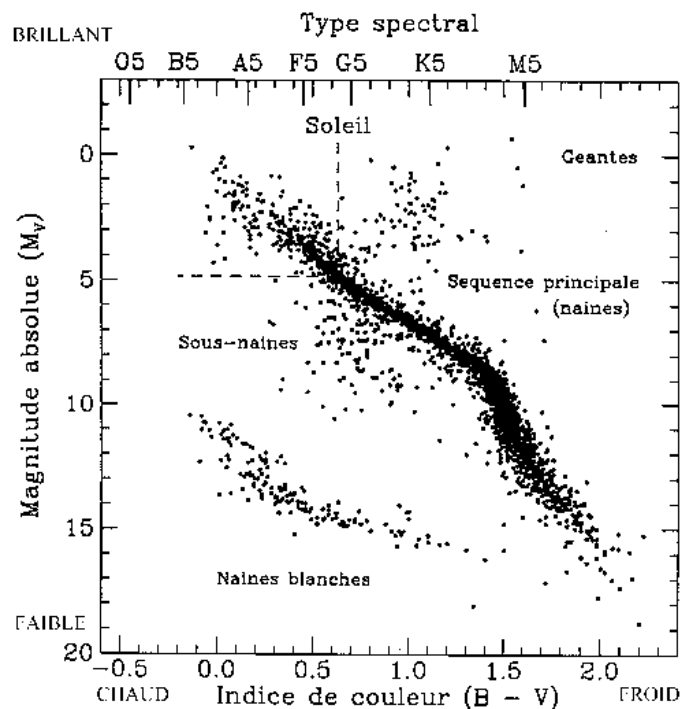
En déterminant la différence d'émission de lumière entre deux couleurs (ici le bleu et le vert), on trouve l'indice de couleur de l'étoile, abscisse du diagramme HR. Cet indice de couleur est donc lié à la température de surface de l'étoile.

La luminosité d'une étoile est la quantité de lumière émise dans toutes les longueurs d'onde. Seulement plus une étoile est loin, moins on la voit brillante. Sa brillance apparente, la magnitude apparente, dépend de la luminosité de l'étoile et de la distance qui nous sépare d'elle. Le diagramme HR a pour ordonnée la magnitude absolue, c'est-à-dire la magnitude à laquelle on verrait les étoiles si elles étaient toutes placées à la même distance de nous, à 10 parsecs (1 parsec = 3,26 Année de Lumière). La distance d'une étoile nous est donnée par la loi de Pogson, qui relie la magnitude absolue d'une étoile à sa magnitude apparente.

A un indice de couleur donné peut correspondre plusieurs magnitudes absolues. Il y a en effet plusieurs branches dans le diagramme HR (la séquence principale, les géantes, les naines) qui chacune correspond à un stade donné d'évolution de l'étoile. A chaque stade d'évolution correspond la présence de certains éléments dans la composition de l'étoile, révélée par une étude spectroscopique (que nous ne détaillerons pas ici). La connaissance du type spectral de l'étoile (en réalisant une analyse spectrale de l'étoile, en cherchant dans la littérature ou avec le logiciel de cartographie du ciel [Stellarium](#)) permet de placer de manière univoque une étoile en ordonnée sur le diagramme HR.

Pour trouver la distance d'une étoile il faut :

- calculer sa magnitude apparente, dans le vert et le bleu
- connaître le type spectral de l'étoile
- utiliser la loi de Pogson.



Calcul des magnitudes et de l'indice de couleur :

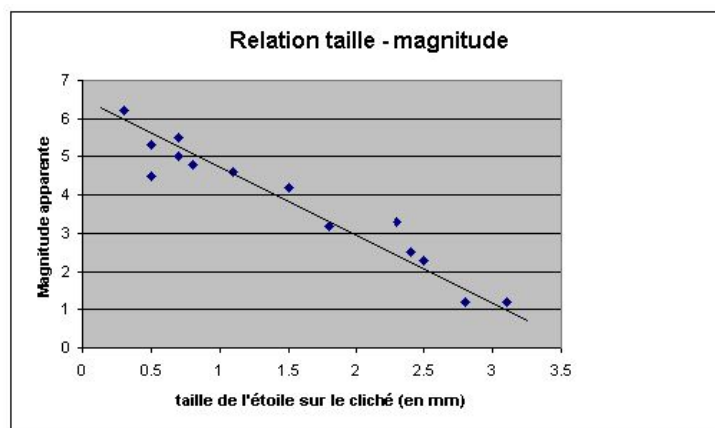
Pour trouver l'indice de couleur et la magnitude apparente d'une étoile, on va la comparer aux étoiles voisines. On suppose donc qu'on dispose de suffisamment d'informations sur les étoiles voisines de l'étoile qui nous intéresse (magnitudes apparente, dans le bleu et le vert). Pour avoir l'indice de couleur de l'étoile, il faut trouver sa magnitude dans le bleu (B) et celle dans le vert (V). La différence entre les deux magnitudes nous donne l'indice de couleur $i = B - V$.

Avec un appareil argentique :

En photographie argentique, la pellicule est faite de grains d'argents qui, au contact de la lumière, vont changer de couleur. Quand un grain d'argent reçoit beaucoup de lumière, il va faire réagir de la même manière les grains voisins. Plus une étoile sera brillante, plus la tache qu'elle fait sur la pellicule sera grande. C'est donc en comparant la taille des étoiles sur la pellicule que nous aurons les renseignements recherchés.

En pratique, il faut, pour chaque magnitude (apparente, sans filtre, bleue et verte, avec les filtres correspondant) :

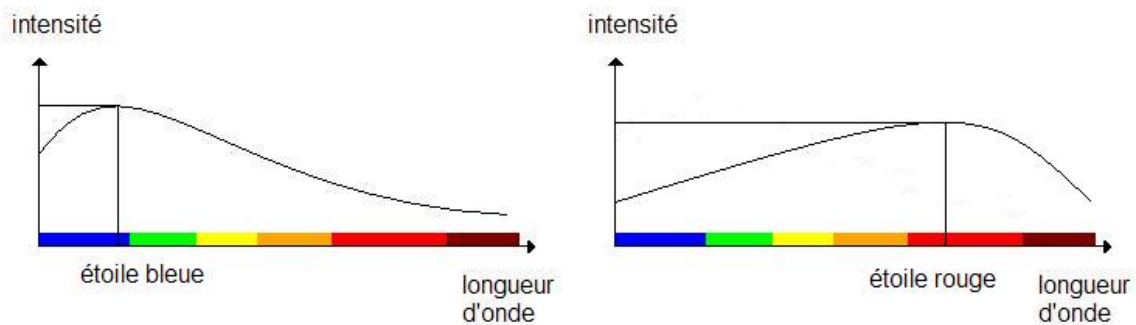
- prendre en photo un champ d'étoiles contenant l'étoile dont on veut mesurer la distance
- en faire un tirage assez grand (ou mieux, la prendre en diapositive et projeter la diapo sur un mur)
- mesurer les tailles des principales étoiles visibles sur la photo (étoiles dont on connaît les magnitudes) et la taille de « notre » étoile.
- placer ces étoiles sur un graphique ayant pour abscisse la taille de l'étoile sur la photo et en ordonnée la magnitude de l'étoile. On doit pouvoir tracer une droite qui corresponde au mieux à l'ensemble des points de ce graphique. Cette droite nous permettra de déterminer la magnitude de « notre » étoile !



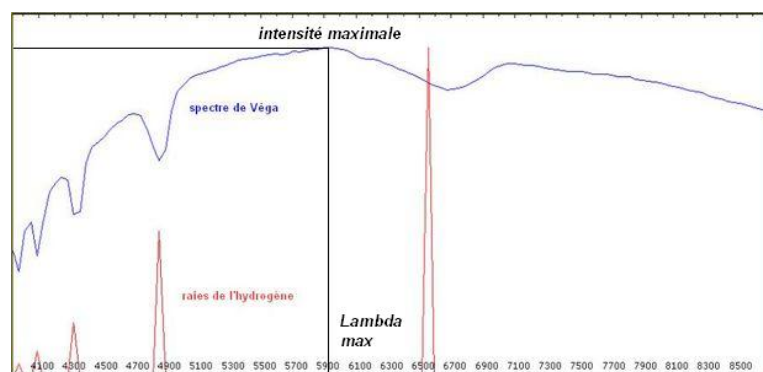
Exemple de relation taille de l'étoile sur le cliché - magnitude, obtenue après analyse d'une photographie

En spectroscopie :

Le principe avec cette méthode est de repérer à quelle longueur d'onde l'émission de lumière de l'étoile est maximale. Pour des étoiles brillantes (bien visibles à l'œil nu, correspondant à une magnitude - échelle de brillance - inférieure ou égale à 1), un télescope n'est pas nécessaire. Sinon, il faut placer un réseau sur une webcam ou un appareil photo, au foyer d'un télescope ou en parallèle (*cf.* la fiche technique *spectroscopie*).



En repérant (à l'aide d'un logiciel d'analyse d'image - [Iris](#) - ou de spectre - [VSpec](#)) on repère l'intensité maximale, et la longueur d'onde correspondante.



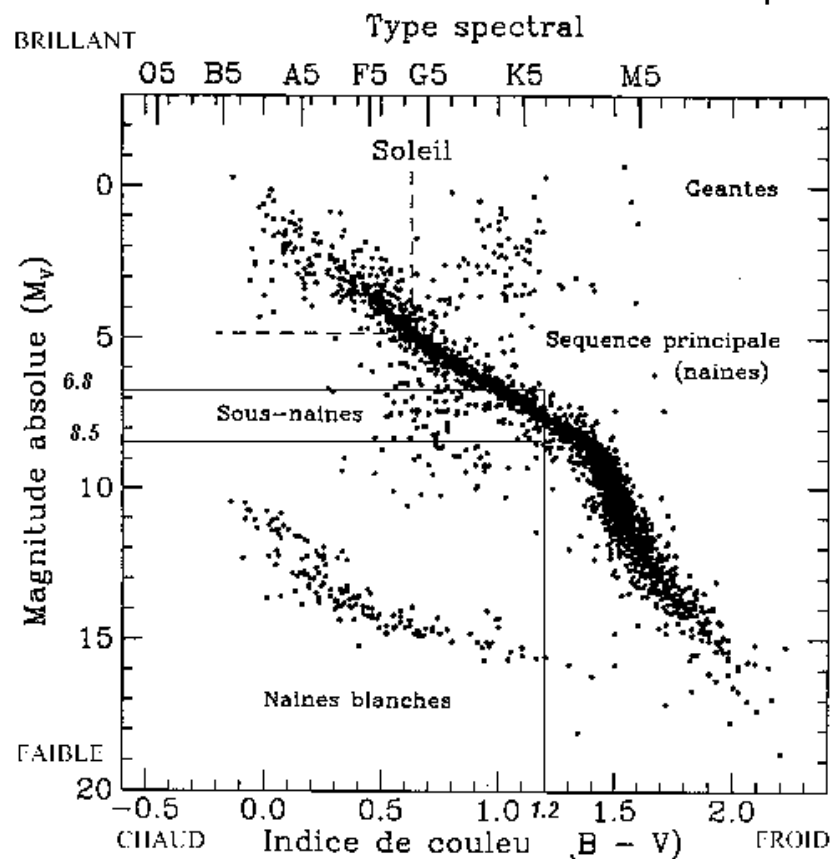
*Exemple de résultat obtenu avec VSpec
(on a aussi superposé en rouge les raies de l'hydrogène,
observées dans le spectre de l'étoile)*

Placer l'étoile sur le diagramme HR pour trouver sa magnitude absolue :

Maintenant que nous avons l'indice de couleur de l'étoile, nous avons son abscisse sur le diagramme HR (attention ! il faut prendre soin de prendre un diagramme HR dont l'abscisse est donnée en indice de couleur B-V).

Il nous faut savoir si l'étoile est une géante rouge, une géante bleue, une naine blanche ou une étoile de la séquence principale pour savoir où la placer en ordonnée sur ce diagramme. Cette information peut se trouver dans la littérature ou sur Internet, assez facilement pour les étoiles les plus connues.

Les étoiles ne sont pas toutes très groupées sur le diagramme HR, les branches de celui-ci ont une certaine épaisseur. L'incertitude avec laquelle on détermine la magnitude absolue est importante. Si, par exemple, notre étoile a un indice de couleur de valeur $i = 1,2$, et qu'on sait que c'est une étoile de la série principale, on peut dire qu'elle a une magnitude absolue comprise entre 6,8 et 8.5 (voir figure ci-dessous).



La loi de Pogson et la distance de l'étoile :

Plus une source de lumière est loin de nous, moins on la voit. La loi de Pogson nous permet de quantifier la relation entre distance et luminosité d'une étoile.

Elle s'exprime ainsi :

$$M - m = 5 - 5 \log d$$

où M est la magnitude absolue, m la magnitude apparente et d la distance (en parsec) de l'étoile.

On en déduit la distance cherchée :

$$d = 10^{\left(\frac{m-M+5}{5}\right)}$$

Précisions sur la prise d'image :

Si l'étoile dont on cherche la distance est très brillante (magnitude inférieure ou égale à 2), une photo d'une durée de l'ordre de trente secondes peut suffire. Dans ce cas, il suffit de disposer l'appareil photo sur un pied photo. Si par contre on cherche à mesurer la distance d'étoiles plus faibles, il faut poser plus longtemps. Au-delà de 30 s de pose, il y a un risque que les étoiles aient bougé dans le ciel, et que notre image soit ratée. Il faut dans ce cas installer le pied photo en

parallèle sur un télescope ayant une monture motorisée, nous permettant un suivi sur plusieurs minutes.

Incertitude de cette méthode :

L'incertitude de la mesure vient de plusieurs paramètres :

- la qualité du suivi
- en argentique, la non-linéarité de la relation taille - magnitude
- la qualité des filtres
- la qualité du capteur (qui n'est pas sensible de la même manière dans toutes les couleurs) : il faudrait tenir compte de la réponse de la caméra

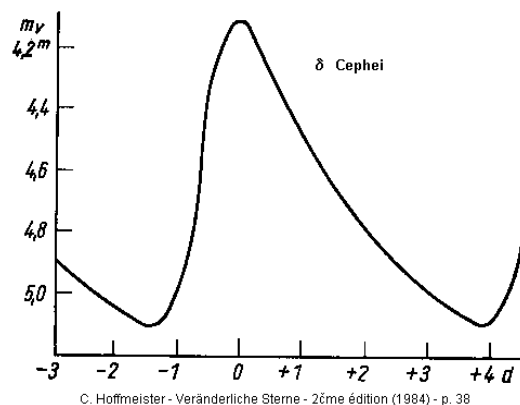
mais la plus grande incertitude vient, et de loin, du placement de l'étoile sur le diagramme HR pour en trouver la magnitude absolue. Dans l'exemple pris ci-dessus, en prenant la plus basse magnitude absolue mesurée on trouve une distance de 4.37 parsecs, et de 1.38 parsecs en prenant la plus grande magnitude absolue, soit une erreur relative de presque 100%...

Souvent l'incertitude est telle que la distance trouvée varie du simple au quintuple...

Méthode 2 :

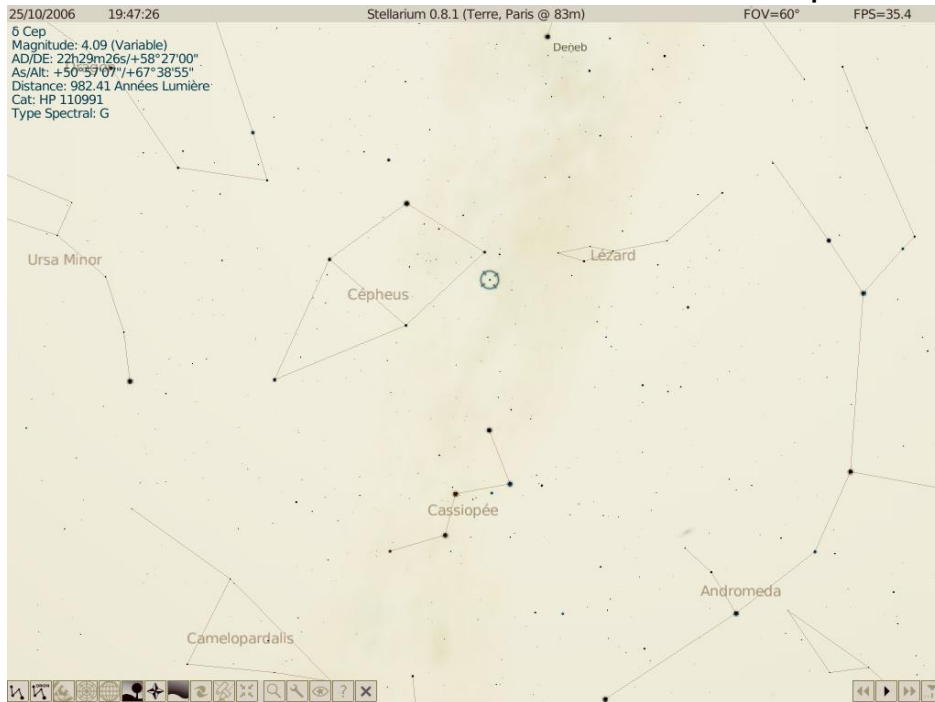
Certaines étoiles ont une luminosité variable et on les appelle « étoiles variables ». Elles peuvent être de différentes natures : instabilité de l'équilibre entre gravitation, effets des fusions nucléaires en leur centre et forces de pression du gaz, régulier ou irrégulier, brusque ou lent, passage d'une étoile devant une autre, explosion, etc. Un certain type d'étoiles variables, les céphéides, varient rapidement et permettent de déterminer la distance des étoiles.

L'observation de telles étoiles dans d'autres galaxies que la nôtre nous permet d'évaluer leur distance.



Exemple de variation de lumière (étoile δ Céphée)

Les céphéides sont des étoiles assez jeunes, géantes, et instables. Leur période de variabilité est de l'ordre de quelques jours à 100 jours. Elles tirent leur nom de l'étoile δ Céphée.



Carte du ciel autour de la région de δ Céphée (vue de [Stellarium](#))

En les choisissant bien, on peut suivre sur quelques nuits la variation de l'éclat d'une étoile, et trouver sa période de variation. La période de variation P des céphéides est liée à leur masse et à la quantité de lumière qu'elles émettent (leur magnitude absolue M). Il y a deux types de céphéides (type I et type II), les premières ont une période de variation de l'ordre de quelques jours, les secondes de plusieurs dizaines de jours. Nous nous intéresserons ici aux céphéides de type 1, dont on peut déterminer la période de variation plus rapidement.

De manière générale, la relation période - luminosité s'exprime : $M = a \log P + b$, où a et b sont des constantes.

On a à peu près :

$$M = -2,60 \log P - 1,45$$

Quelles étoiles choisir ?

Voici une liste des principales étoiles de type céphéide observables en France (certaines ont une page donnant plus d'information sur le site *Wikipedia* - en Anglais - d'autres pas encore) :

Nom	Constellation	Magn. app. max.	Mag. app. min.	Période (jours)	Commentaire
η Aql	Aigle	3,48	4,39	7,17664	Observable du printemps à l'automne
X Cyg	Cygne	5,85	6,91	16,38633	Observable du printemps à l'automne
SU Cyg	Cygne	6,44	7,22	3,84555	Observable du printemps à l'automne
ζ Gem	Gémeaux	3,62	4,18	10,15073	Observable en automne et en hiver
BF Oph	Ophiucus	6,93	7,71	4,06775	Observable de la fin du printemps à la fin de l'été
U Sgr	Sagittaire	6,28	7,15	6,74523	Observable de la fin du printemps à la fin de l'été
S Vul	Petit Renard	8,69	9,42	68,464	Céphéide de type II, observable du printemps à l'automne
U Vul	Petit Renard	6,73	7,54	7,99068	Observable du printemps à l'automne
δ Cep	Céphée	3,48	4,37	5,36634	LA céphéide, observable toute l'année

Comment évaluer une magnitude variable ?

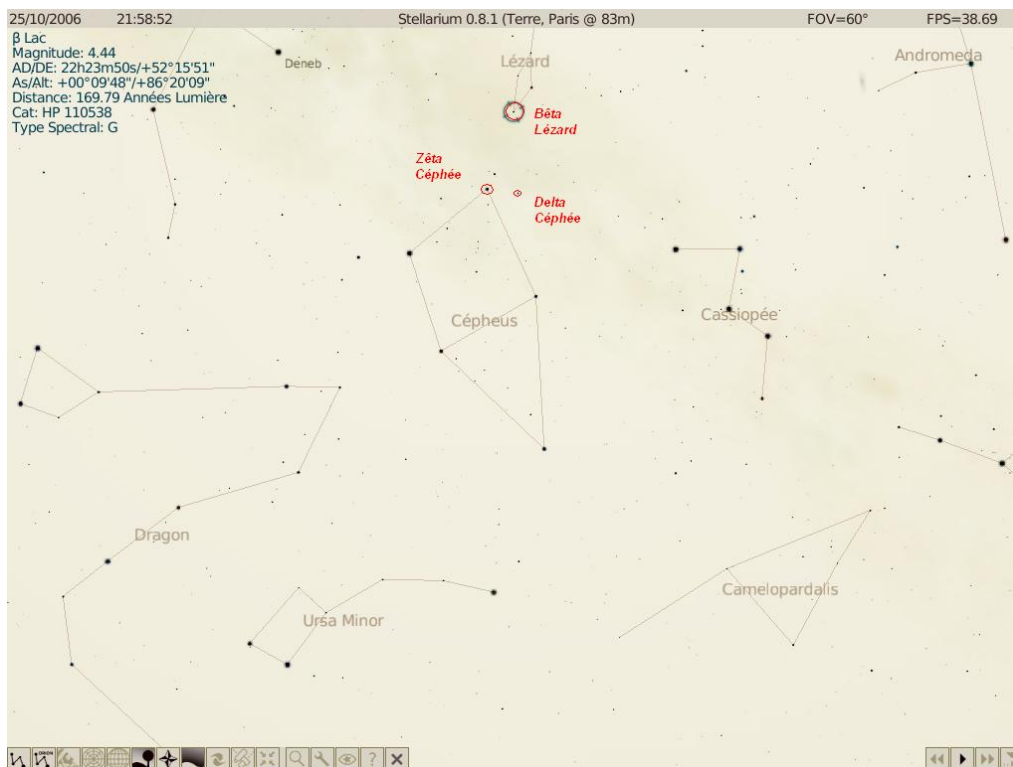
On peut reprendre la méthode photographique présentée en méthode 1 de cette fiche. Elle s'appliquera très bien à cette étude.

Pour des étoiles assez visibles (c'est-à-dire visibles facilement à l'œil nu ou brillantes aux jumelles), on peut utiliser une méthode simple et visuelle qui ne demande pas d'autre instrument qu'une paire de jumelles (et une calculatrice très simple) : la méthode d'Argelander.

Le principe est de comparer la brillance de l'étoile variable aux brillances de deux étoiles non variables et connues (en regardant leur magnitude dans un atlas ou un logiciel de cartographie du ciel). Il faut choisir des étoiles de couleur et de magnitude proche de l'étoile étudiée, et en prendre une plus brillante et une moins brillante, pour que l'expérience fonctionne bien. Il est préférable que les étoiles se situent dans le même champ de vision.

Par exemple, δ Céphée a une magnitude comprise entre 3,48 et 4,37. L'idéal serait de choisir une étoile de magnitude comprise entre 2 et 3, et une autre de magnitude comprise entre 4,5 et 5.

On constate que ζ Céphée a une magnitude de 3,41, et β Lézard de 4,44. Elles correspondent tout à fait à ces critères et nous essaierons de les comparer à δ Céphée.



Conseil : Pour les étoiles variables, on peut demander des cartes, listes d'étoiles et prévisions aux associations d'observateurs d'étoiles variables ([Association Française des Observateurs d'Etoiles Variables](#) , ou l'[AAVSO](#) aux Etats-Unis).

De manière générale, on note les étoiles du champ entourant l'étoile variable par ordre croissant de magnitude (A, B, ..., A étant la plus brillante), et V l'étoile variable. Ici on a :

δ Céphée	V
ζ Céphée	A
β Lézard	B

On note de la manière suivante la différence de brillance entre deux étoiles :

zéro degré : A (0) V	aucune différence entre A et v même après examen approfondi
un degré : A (1) V	pas de différence au premier coup d'œil, mais existence d'un très faible écart après examen approfondi
deux degrés : A (2) V	peu de différence au premier coup d'œil, mais existence d'un faible écart
trois degrés : A (3) V	différence au premier coup d'œil
quatre degrés : A (4) V	nette différence au premier coup d'œil
cinq degrés : A (5) V	grande différence au premier coup d'œil

On fait cet exercice entre A et V puis entre v et B.

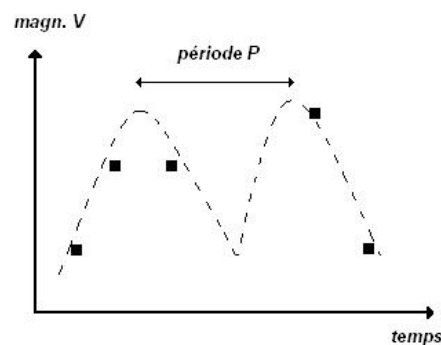
A la fin, on a un résultat du type : A (p) V (q) B, où p et q correspondent aux degrés de différence observés.

Les coefficients m et n vont nous permettre de déterminer dans quelle mesure la magnitude de V (m_V) est plus proche de celle de A (m_A) ou de celle de B (m_B), avec la formule :

$$m_V = \left(\frac{m_B - m_A}{p + q} p \right) + m_A$$

Comment évaluer la période ?

Pour les céphéides dont la période de variation est la plus courte, on peut noter une variation sur une seule soirée d'observation, en prenant des mesures toutes les heures par exemple. Même si les observations sont parcellaires (s'il a fait mauvais par exemple) et s'étalent sur plusieurs périodes de variation, l'expérience peut aboutir. Le plus important est de trouver la durée d'une période de variation (temps qui sépare deux maximums de brillance).



A partir de quelques observations (les carrés) on peut tracer une courbe qui correspond le mieux aux variations et en déduire la période de variation.

En remplaçant la période P trouvée dans la formule liant période de variation et luminosité, on trouve la magnitude absolue M de notre étoile : $M = -2,60 \log P - 1,45$.

Comme pour la méthode 1, l'écart entre magnitude absolue et magnitude apparente nous donnera une valeur de la distance de l'étoile, grâce à la loi de Pogson : $M - m = 5 - 5 \log d$, où m est la magnitude apparente moyenne observée de notre étoile et d sa distance (en parsec).