

Delta de Céphée, une étoile inconstante

Georges Paturel, observatoire de Lyon

Cet article présente une étoile dont l'inconstance, longtemps mystérieuse, a été comprise et largement utilisée. Nous allons parler de cette étoile emblématique, au point de donner naissance à une classe d'étoiles variables : les variables céphéides.

Quelques mots d'histoire

Vous savez que les Anciens croyaient à un ciel immuable. Ne parlait-on pas de la « sphère des fixes », par opposition aux mobiles planètes ? Il en allait de même de l'éclat des étoiles. Les étoiles brillaient toujours, et toujours de la même façon. La première surprise vint des découvertes des "novae" (à prononcer nové, comme "rosa rosam rosae" ; je crois qu'il est admis aujourd'hui de parler de nova avec un s s'il y en a plus d'une). Après cette parenthèse de vocabulaire, je poursuis. Une nova n'était pas dans l'esprit des gens une étoile variable mais une étoile nouvelle (d'où le nom). Après tout, comme le faisait dire Soljenitsyne à un de ses personnages, il fallait bien recréer des étoiles nouvelles, puisque certaines disparaissaient en étoiles filantes !

Tycho Brahe fut un découvreur chanceux. Il écrivit en substance : « *un jour ordinaire, le 11 novembre¹ 1572, je sortis dehors et constatait immédiatement qu'une étoile occupait une place inhabituelle. Ce n'était pas une planète. Il s'agissait d'une étoile nouvelle* ». Nous savons aujourd'hui que ce n'était pas seulement une nova, mais une supernova, une étoile qui explose et devient aussi lumineuse qu'un noyau de galaxie.

Dans un passé très lointain, qui se perd dans les ténèbres de l'histoire, une véritable étoile variable fut découverte : Algol. On sait aujourd'hui que ce n'est pas à proprement parler une étoile variable. Certes, on voit son éclat changer, mais simplement parce qu'un compagnon sombre passe régulièrement dans la ligne de visée. Quand il est derrière Algol, l'ensemble perd un peu de son éclat. Quand il est devant, l'ensemble perd encore plus d'éclat puisque c'est une partie de l'étoile, très chaude, qui est masquée.

¹ Un onze novembre n'est pas un jour ordinaire ; c'est un jour férié (G. Walusinski :-)

Et puis ce fut la découverte d'une étoile admirable dans la constellation de la Baleine : Mira Ceti. Les astronomes avaient eu le temps de se faire à l'idée que des étoiles pouvaient être variables. Mais, ils ne connaissaient pas les causes de la variabilité. Avec Mira Ceti, c'était une nouvelle catégorie, celle des étoiles réellement pulsantes, comme celle découverte en 1784 par John Goodricke, un astronome amateur. On pense qu'il recherchait les étoiles variables, car son mentor lui avait parlé d'Algol et de Mira Ceti. Évidemment, John Goodricke ignorait le mécanisme responsable de cette variation régulière. Il faut dire que pendant très longtemps certains astronomes refusaient l'idée qu'une étoile puisse varier. Je me souviens avoir retrouvé une thèse ancienne, où l'auteur, dont j'ai oublié le nom, analysait la possibilité que la variation fût due à la présence d'un compagnon.

Avant de poursuivre l'étude de delta Céphée, je vais vous raconter une anecdote. L'"astro-dame" Antoinette de Vaucouleurs avait analysé des mesures d'éclat de galaxies. Elle conclut que l'éclat semblait variable pour certaines. Elle en parla à Gérard, son mari, astronome célèbre dans le monde des galaxies. Il sourit en déclarant "s'il y a une chose constante, c'est bien l'éclat d'une galaxie". Eh bien, ce jour-là, Gérard et Antoinette ratèrent l'occasion de découvrir, ce qu'on appelle aujourd'hui, les galaxies à noyaux actifs de Seyfert, du nom du découvreur de ce phénomène.

Tout bouge et tout tourne dans l'univers. Telle devrait être la moralité de ce bref examen historique.

Peut-on l'observer ?

Revenons à notre étoile delta Céphée. Peut-on observer par nous-mêmes cette variabilité, sans grand moyen ? La réponse est oui, sinon je n'aurais pas posé la question. Bien. Mais :

1. Où est cette étoile ?
2. Comment l'identifier ?
3. Comment voir sa variation d'éclat ?

Pour répondre à la première question je vais utiliser une carte annotée par Daniel Bardin.

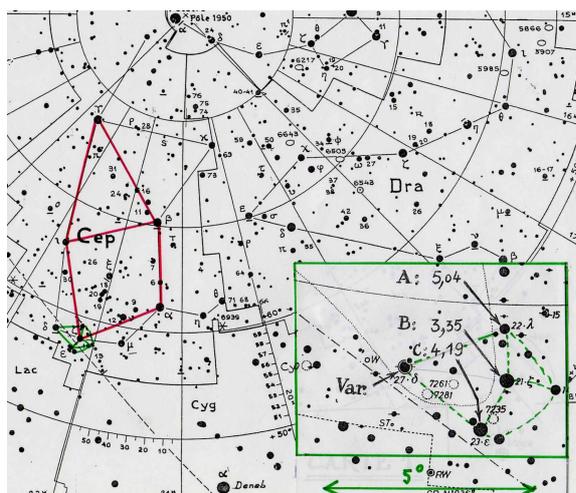
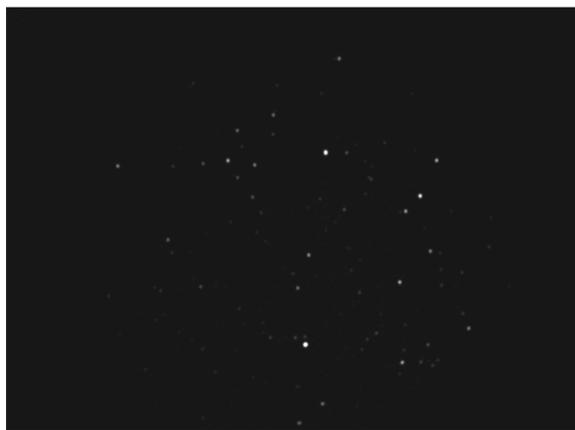


Fig.a. La région de Céphée (la "maison en rouge") selon D. Bardin. Dans l'angle, en bas à gauche de la maison, vous voyez le "parachute".

Fig.b. région du parachute agrandie.

Si vous avez lu la légende de la carte, vous avez repéré le parachute. Pour voir un parachute il faut tourner le cadre vert de 90° sur la gauche. Delta Céphée est l'étoile qui se balance au bout des suspentes. Si vous pointez cette région avec des jumelles bien calées, vous verrez sans peine ce "parachute". Je vous montre une photo prise derrière des jumelles avec une pose de 10 secondes, le 20 octobre 2008. Exercez-vous à reconnaître delta Céphée. C'est très facile, le parachute est dans le sens habituel d'un parachute. Nous avons répondu à la deuxième question.



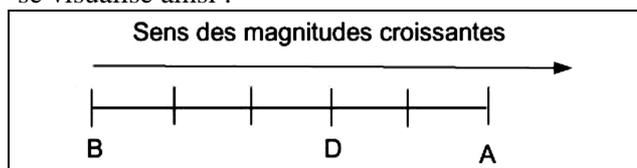
Amusez-vous à reconnaître le parachute. Delta Céphée est l'étoile brillante au bas de la photo. Notez aussi que cette étoile peut-être pointée en été comme en hiver. C'est pratique pour pouvoir la suivre longtemps !

Répondons à notre troisième question. Deux méthodes s'offrent à nous : l'une simple et l'autre compliquée. Commençons par la plus simple, la méthode d'Argelander.

La méthode d'Argelander

Avant d'expliquer la méthode, éliminons un problème, celui de l'extinction atmosphérique. Plus une étoile est haute dans le ciel, plus son éclat est grand. Cette variation est due à la traversée de l'atmosphère terrestre. Au zénith, la longueur traversée est moindre. L'éclat de l'étoile est plus grand. Près de l'horizon, la longueur est plus grande. L'éclat est faible. Il ne faudra pas confondre les variations intrinsèques de l'étoile avec cette variation géométrique. La méthode d'Argelander va nous affranchir de ce problème. En effet, toutes les magnitudes d'une même région du ciel seront affectées de la même quantité car la variation d'éclat dépend de l'éclat lui-même (pour vous en convaincre voir l'encadré ci-dessous). Même si la transparence du ciel varie doucement, les différences des magnitudes entre étoiles voisines resteront les mêmes. Il suffit donc de comparer delta Céphée aux étoiles voisines, par exemple les étoiles A, B et C (revoir le cadre vert), qui ont respectivement les magnitudes $m_A = 5,04$; $m_B = 3,35$; $m_C = 4,19$.

Le principe consiste à interpoler visuellement la magnitude de delta Céphée (que nous désignerons par D) entre celles de deux étoiles (par exemple A et B). Si visuellement on pense pouvoir distinguer 5 gradations entre A et B, on donne la valeur estimée pour D en notant à quelle fraction elle se trouve de l'une et de l'autre. Par exemple, si D est plus proche de A d'une gradation sur cinq, on notera sur son carnet d'observation : B3D2A. Graphiquement cela se visualise ainsi :



Visualisation graphique de la méthode d'Argelander

Une gradation a pour valeur : $(m_A - m_B) / 5$

La magnitude de D se calculera alors par l'une des deux relations linéaires suivantes :

$$m_D = m_A - 2(m_A - m_B) / 5$$

$$m_D = m_B - 3(m_A - m_B) / 5$$

En utilisant les deux relations, vous pouvez vérifier que vous obtenez le même résultat. Si ce n'est pas le cas, il y a une erreur de calcul. Avec l'expérience, un bon observateur parvient à estimer une magnitude au dixième près. Avec une méthode artisanale² basée sur l'emploi de jumelles et d'un

² Cette méthode photométrique requerrait de nombreux calculs.

appareil photo numérique, nous avons péniblement atteint une précision de 0.2 magnitude. Voici le résultat d'une série d'observations de delta Céphée.

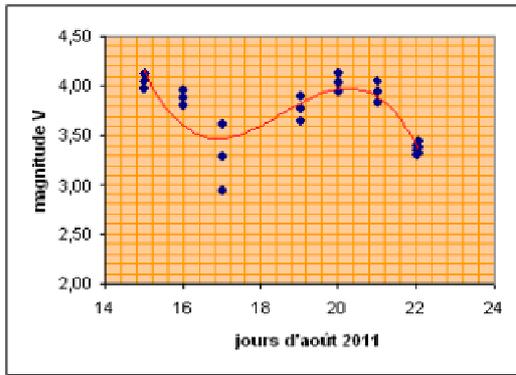


Fig.2. La variation de delta Céphée est visible. On voit que trois mesures ont été faites chaque nuit.

La période trouvée est de l'ordre de 6 jours (la valeur admise est de 5,4 jours), avec une magnitude variant de 3,5 à 4,2 (la variation admise est entre 3,6 à 4,3).

ENCADRÉ 1 : Une variation relative d'éclat est une variation de magnitude !
Éclat et magnitude apparente sont reliés par la relation : $m = -2,5 \log(E) + cte$. La variation de magnitude m est (en approximant, pour de petites variations, $\Delta \ln E$ par $\Delta E / E$) :

$$\Delta m = -2,5 \Delta \log_{10} E$$

$$\Delta m = -\frac{2,5}{\ln 10} \frac{\Delta E}{E} = -1,086 \frac{\Delta E}{E} \approx -\frac{\Delta E}{E}$$

C'est bien ce que je disais... à peu près.

Que se passe-t-il ?

Aujourd'hui, on parvient à mesurer le diamètre apparent de certaines étoiles et de quelques étoiles céphéides. On a donc la certitude que delta Céphée est une étoile qui pulse, qui respire, pour parler en termes imagés. Son diamètre croît et décroît lentement. Sa luminosité fait de même. Le diamètre de delta Céphée varie entre 45 et 50 millions de kilomètres en un peu plus de cinq jours. Il a fallu beaucoup de temps pour en arriver à cette conclusion. Maintenant que nous savons cela, expliquons ce qui se passe, à la lumière des avancées théoriques et expérimentales.

Le κ -mécanisme³

Quand les étoiles ont évolué, elles contiennent de l'hélium. On sait en effet que l'hydrogène fusionne

en hélium, au terme de processus nucléaires complexes libérant l'énergie qui permet aux étoiles de résister à l'inexorable effondrement gravitationnel. Elles occupent, à cette phase de leur évolution, une zone particulière du diagramme Hertzsprung-Russell dans lequel se représente le chemin évolutif des étoiles. Cette zone s'appelle la *bande d'instabilité*, car, à ce stade de leur évolution, toutes les étoiles sont variables. L'origine de cette instabilité est la suivante : Si, par suite d'une perturbation – et on sait que les étoiles ne sont plus les objets tranquilles, que les anciens imaginaient – l'étoile se contracte, les couches intermédiaires s'échauffent. L'augmentation de température, qui devrait faire augmenter la pression et arrêter la contraction est utilisée pour ioniser l'hélium. La contraction ne s'arrête donc pas immédiatement. Mais l'hélium ionisé est moins transparent, plus opaque (l'opacité κ augmente). L'énergie interne de l'étoile ne peut plus s'évacuer. La pression interne devient alors plus forte et la contraction initiale fait place à une expansion. L'énergie d'ionisation accumulée est restituée. L'étoile se dilate encore, en allant au-delà du rayon d'équilibre. Arrivé à un certain rayon, l'hélium sera redevenu transparent. La dilatation s'arrêtera et une nouvelle contraction pourra commencer.

Peut-on prédire la période d'oscillation pour trouver les facteurs dont elle dépend ? C'est ce que nous allons voir.

La relation Période-luminosité-Couleur

Vous avez sans doute déjà entendu parler de la fameuse relation Période-Luminosité (PL en abrégé) des céphéides. Une belle découverte de Miss Henrietta Leavitt, dans les années 1912-1913 ! Nous allons voir que la relation physique est une relation Période-Luminosité-Température. La température étant corrélée à un indice de couleur, on parle plutôt de Relation Période-Luminosité-Couleur (PLC, en abrégé).

On peut montrer⁴ que la période P est proportionnelle à la racine carrée de la masse volumique. On peut alors écrire :

$$P \propto \left(\frac{M}{R^3}\right)^{1/2}$$

où, M est la masse totale de l'étoile et R son rayon.

³ Ce nom vient de la variable κ (kappa en grec) utilisée par les théoriciens pour désigner l'opacité de la matière, fonction de la longueur d'onde

⁴ On peut le montrer soit par la loi de Kepler en considérant le déplacement de matière, soit par la loi de propagation d'une onde dans un milieu de densité donné.

$$\text{d'où : } P \propto \left(\frac{M}{R^3} \right)^{1/2}$$

Or la masse est approximativement proportionnelle à une certaine puissance de la luminosité (plus une étoile est massive, plus elle est lumineuse). Certes cette relation n'est pas absolue, mais pour une classe d'objets similaires, cette relation est bien vérifiée.

De plus, la luminosité est proportionnelle à la puissance quatrième de la température (loi de Stephan) et à la surface rayonnante (donc au carré du rayon). En combinant ces relations, on déduit assez facilement⁵ que la période dépend de la luminosité et de la température.

Par ailleurs, nous l'avons dit, il y a une relation entre la température et l'indice de couleur. Donc la véritable relation utile pour l'observation est une relation PLC. Elle se représente bien par l'équation d'un plan quand Période et Luminosité sont remplacées par leur expression logarithmique.

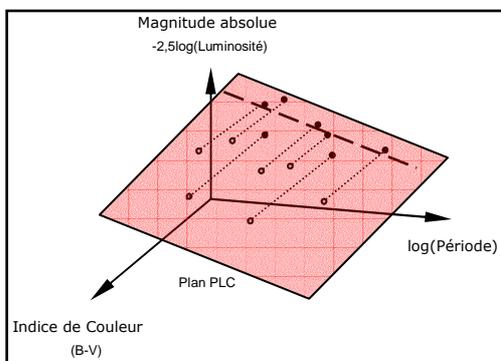


Fig.3. Le plan représentant la relation PLC "linéarisée".

Notons que la luminosité est donc remplacée par la magnitude absolue. Quant à l'indice de couleur, qui n'est autre que la différence entre deux magnitudes de longueurs d'onde différentes, c'est déjà, par définition une expression logarithmique. On utilisait autrefois l'indice de couleur B-V (différence des magnitudes bleue et "visible" – c'est-à-dire le jaune), aujourd'hui on utilise plus volontiers l'indice de couleur V-I (différence de magnitude entre le "visible" et le proche infrarouge)

L'expression de la relation PLC est donc :

$$M_0 = \alpha \log P + \beta C + \gamma \quad (1)$$

où α , β et γ sont des constantes numériques.

Moyennant quelques hypothèses simples, on trouve les valeurs approximatives de α et β (- 4 et 4 respectivement). Mais en pratique, on préfère des déterminations expérimentales. Pour la constante γ , il faut avoir recours à une calibration de distance d'au moins une étoile céphéide. Cette calibration se fait par parallaxes trigonométriques depuis des satellites (Hipparcos ou Gaia).

⁵ Voir le n° 121 des Cahiers Clairaut, page 2.

Comment utiliser la relation PLC

Si vous avez lu quelques livres de vulgarisation, vous avez compris que c'est la relation Période-Luminosité (PL) qui est utilisée pour déterminer la distance d'étoiles céphéides lointaines et non pas la relation PLC.

Deux questions se posent alors :

1. Pourquoi ne pas utiliser la bonne relation ?
2. Quels en sont les inconvénients ?

Quand on veut calculer la distance d'objets lointains (typiquement des galaxies dans lesquelles on observe des étoiles céphéides), on calibre la relation avec quelques céphéides proches membres de notre Galaxie. On suppose naturellement que les lois de la Nature sont les mêmes sur Terre et dans les galaxies étudiées. Cette hypothèse implicite est le credo universel de la science.

Les céphéides de notre Galaxie sont baignées dans la poussière interstellaire. La lumière que nous recevons est affectée par la traversée de cette poussière. Par exemple, les magnitudes B, V et I utilisées pour calculer les indices de couleur B-V ou V-I sont altérées par le fait que l'absorption n'est pas la même pour chaque étoile et, pire, que l'absorption n'est pas la même selon les longueurs d'onde. Les petites longueurs d'onde sont plus affectées que les grandes. On dit que les magnitudes sont rougies, car les étoiles nous paraissent plus rouges qu'elles ne le sont en réalité. C'est un peu comme quand on voit le Soleil à travers un nuage de fumée.

Ce rougissement (qu'on appelle l'excès de couleur) permet de mesurer l'absorption dont nous avons besoin pour corriger la magnitude apparente. Le calcul complet montre qu'il apparaît une dégénérescence qui rend la distance très imprécise. Que faire ?

Si on suppose que, en moyenne, la valeur de la couleur C de notre échantillon de céphéides est constante, le terme ($\beta C + \gamma$) de la relation (1) devient une constante et la relation PLC devient une relation PL. Le calcul se simplifie et la dégénérescence diminue. On en tire l'expression correcte de la distance (cf. l'article cité à la note 5).

Mais attention, on reste toujours avec l'hypothèse forte que la couleur intrinsèque des échantillons considérés est constante, quelle que soit leur distance. Cette hypothèse est potentiellement source de biais statistiques. En effet, notre échantillon de calibration, en moyenne moins lumineux intrinsèquement que l'échantillon distant, a une couleur moyenne différente. Donc la calibration est faussée.

Ah ! Si nous avions une parfaite compréhension théorique de la relation PLC, ce serait plus facile ! Il faut toujours que la théorie et la pratique avancent ensemble. « En théorie, il n'y a pas de différence entre la théorie et la pratique, en pratique si ! ».