

## La relation Période-Luminosité-Couleur des Céphéides

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

**Résumé :** *La relation Période-Luminosité des Céphéides est bien connue ; elle a permis historiquement d'estimer la distance des galaxies les plus proches. Ce qui est moins connu, c'est que la véritable relation physique est une relation Période-Luminosité-Couleur. Négliger cette réalité peut conduire à une mauvaise estimation des distances. Le phénomène que nous allons expliquer est subtil, cependant il est à la portée d'un physicien néophyte, moyennant quand même une certaine dose de ténacité. Mais au bout de cette compréhension, il y a la satisfaction d'entrevoir les vraies difficultés, non encore complètement comprises et admises par tous. Cet article me donnera l'occasion d'évoquer une recherche personnelle en cours avec un collègue finlandais.*

### Introduction

Dans une série d'articles, nous avons vu, à travers des exercices pratiques, comment les astronomes calculent la distance des étoiles les plus proches par la méthode des parallaxes, puis au-delà, par relation Période-Luminosité (PL) pour déduire par exemple la distance des galaxies les plus proches. Cette démarche a été celle de Edwin Hubble, lorsqu'il démontra que certaines nébuleuses, visibles avec de gros télescopes, étaient des objets situés en dehors de notre Voie Lactée. Ces nébuleuses prirent le nom de nébuleuses extragalactiques, ou galaxies. La Voie Lactée prit aussi le nom de "Galaxie", avec un grand G.

La relation Période-Luminosité est ainsi devenue très populaire. Elle avait été découverte par Miss Henrietta Leavitt, d'une manière fortuite. En effet, cette "astrodame" s'intéressait aux Céphéides du Grand Nuage de Magellan. On sait maintenant que ce nuage est une petite galaxie naine, satellite de notre propre Galaxie. Toutes les étoiles Céphéides du Grand Nuage de Magellan sont approximativement à la même distance de nous. Donc, si on les classe selon leur éclat apparent, elles seront aussi classées selon leur luminosité intrinsèque. C'est ce que fit Miss Leavitt et, oh ! surprise ! les étoiles se trouvaient également classées selon leur période de variation. Il y avait donc une relation simple entre la période de

variation d'éclat et la luminosité moyenne (voir l'article CC115, p9).

Il est alors facile de mesurer la distance d'une Céphéide : on mesure sa période de variation d'éclat (cette période s'échelonne entre quelques jours et quelques centaines de jours). La relation de Miss Leavitt conduit alors à la luminosité moyenne et, par une mesure de l'éclat apparent moyen, à la distance.

Cette présentation simpliste est très répandue, mais nous allons montrer que les principales difficultés sont occultées.

Nous allons, tout d'abord, expliquer le mécanisme physique responsable de la pulsation d'une Céphéide. Puis nous essayerons de prévoir la relation liant la période de pulsation aux caractéristiques de l'étoile. Nous comprendrons alors les problèmes et nous essayerons de les résoudre.

Cette pulsation est fondamentalement liée au " $\kappa$ -mécanisme". Nous allons tenter de l'expliquer simplement.

### Le $\kappa$ -mécanisme (prononcer "kappa")

Quand les étoiles ont évolué depuis leur phase de grande stabilité (la séquence principale dans le diagramme Hertzsprung-Russell (diagramme HR - voir l'article page 24), elles contiennent de l'hélium dans leurs couches profondes. Elles occupent une

région particulière du diagramme HR. Cette région s'appelle la bande d'instabilité, car, à ce stade de leur évolution, les étoiles sont variables. L'origine de cette instabilité est la suivante. Si, par suite d'une perturbation, l'étoile se contracte, les couches intermédiaires s'échauffent à cause de la réduction du diamètre de l'étoile. Cette augmentation de température devrait faire augmenter la pression et arrêter la contraction. Mais il se passe autre chose. C'est l'hélium qui va absorber cette énergie en s'ionisant. La contraction de l'étoile pourra donc se poursuivre, tandis que la transparence du milieu se réduit, empêchant l'énergie interne de s'évacuer facilement (le nom du mécanisme vient de la variable  $\kappa$  utilisée par les théoriciens pour désigner la fonction donnant l'absorption en fonction de la longueur d'onde). La force gravitationnelle est quand même progressivement contrebalancée et, finalement, la contraction de l'étoile s'arrête. Mais alors, l'énergie accumulée sous forme d'hélium ionisé va se restituer. L'étoile va se dilater, en allant au-delà du rayon d'équilibre. Arrivé à un certain rayon, l'hélium sera redevenu neutre et le milieu stellaire transparent. La dilatation s'arrêtera et une nouvelle contraction commencera.

Ce mécanisme de stockage d'énergie interne, ressemble à celui d'une masse attachée à un ressort. Quand le ressort est contracté, la masse stocke de l'énergie potentielle, qui, en se restituant, conduit à une oscillation.

### La relation Période-luminosité-Couleur

Essayons de retrouver la loi de cette pulsation. Quand l'étoile est dilatée au maximum, un élément de matière de la couche externe, de rayon  $R$ , sera quasiment en mouvement libre autour du centre de l'étoile de masse  $M_o$ . La troisième loi de Kepler-Newton nous dit alors que<sup>1</sup> :

$$\frac{R^3}{P^2} \propto M_o,$$

d'où l'on tire que

$$P \propto \frac{1}{\sqrt{\frac{M_o}{R^3}}} = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad (1)$$

On a les relations classiques :

<sup>1</sup> Le symbole  $\propto$  signifie "proportionnel à"

$$\bar{\rho} \propto \frac{M_o}{R^3} \text{ et } L \propto R^2 T^4, \quad (2)$$

où  $R$  est le rayon de l'étoile,  $M_o$  la masse totale,  $L$  la luminosité totale et  $T$  la température.

La magnitude absolue  $M$ , dans un domaine de longueur d'onde donné, est définie à une constante additive près par la relation :

$$M = -2,5 \log L + cste \quad (3)$$

De même, on définit une magnitude apparente, pour un domaine de longueur d'onde, par la relation semblable :

$$m = -2,5 \log E + cste$$

où  $E$  est l'éclat apparent, intégré sur le domaine de longueur d'onde considéré.

On a, de plus, une relation semi empirique entre la masse et la magnitude absolue (plus une étoile est massive plus elle est lumineuse). C'est ce qu'on appelle la relation *masse luminosité*. Pour une magnitude absolue à la longueur d'onde 550nm, la relation est la suivante (en toute rigueur, cette relation varie avec la température effective) :

$$M \approx 8 - 7,8 \log M_o \quad (4)$$

On a aussi une relation entre la température effective et un indice de couleur (plus une étoile est chaude plus elle est bleue). Cet indice de couleur est défini comme la différence de magnitude apparente à deux longueurs d'onde très distinctes. Par exemple, la différence entre la magnitude en lumière bleue moins la magnitude en lumière visible (jaune) donne l'*indice de couleur C*. Dans ce cas on note :  $C = B - V$ . La relation entre la température effective et l'indice de couleur  $B - V$  est approximativement :

$$\log T \approx -0,3 C + cste \quad (5)$$

Une démonstration empirique a été donnée en encadré dans un cours précédent (voir CC 113, p3)<sup>2</sup>.

Naturellement, il est possible de déterminer plusieurs sortes d'indice de couleur. Par exemple, en

<sup>2</sup> Rappelons rapidement la méthode. Si on assimile une étoile à un corps noir, la formule de Planck nous donne, pour chaque température, la forme du spectre continu de rayonnement. On peut estimer la couleur pour chaque courbe (donc pour chaque température) en calculant la différence des magnitudes en B (440nm) et en V (540 nm).

considérant les domaines spectraux "visibles" et "infrarouge". L'indice de couleur sera alors  $V-I$ .

En combinant les relations (1), (2), (3), (4) et (5) on arrive, après un calcul facile mais fastidieux, à la relation finale :  $M \approx -4 \log P + 4C + cste$ , où  $C$  est l'indice de couleur  $B-V$  et  $M$  la magnitude absolue en  $V$  (domaine visible).

C'est la vraie relation physique qui est une relation Période- Luminosité- Couleur (période-magnitude absolue- indice de Couleur). La valeur précise des coefficients ( $-4$  et  $4$ ) dépend du système photométrique utilisé.

D'une manière générale la relation PLC s'écrira :

$$M = \alpha \cdot \log P + \beta \cdot \text{Couleur} + \gamma$$

où  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des constantes.

On comprend mieux alors qu'utiliser la simple relation Période-Luminosité  $M=A \log P + cste$ , revient à supposer que tous nos échantillons de Céphéides ont la même Couleur intrinsèque moyenne. Sommes-nous sûrs que les Céphéides locales de calibration ont la même couleur moyenne que les Céphéides lointaines ? *A priori*, on peut penser que oui. C'est l'hypothèse d'uniformité des lois de la nature. Cependant, la luminosité dépend de la couleur. Si, par suite d'un effet de sélection nous sélectionnons des objets intrinsèquement plus lumineux à grande distance (ce qui ne manque pas de se produire simplement parce que les Céphéides plus faibles échappent aux mesures), il y a aura un biais statistique ; la luminosité moyenne sera faussée et la distance aussi.

En résumé, la relation PL est une relation statistique applicable uniquement à un échantillon de plusieurs Céphéides qui garantirait, par un effet de compensation, que la couleur moyenne de l'échantillon soit constante (l'échantillon serait dit "non-biaisé"). En revanche, la relation PLC est une relation physique, applicable à une seule Céphéide, pour peu que l'on puisse effectivement estimer sa couleur intrinsèque. En pratique, toute la difficulté est dans cette dernière condition.

Si on utilise la relation PL, l'échantillon doit être non biaisé (et il n'est pas facile de s'en assurer). Si on utilise la relation PLC, il faut obtenir la couleur intrinsèque, ce qui est très difficile puisqu'il faut connaître l'extinction, ce qui est quasiment impossible, comme nous allons le voir.

## Les problèmes de l'extinction

Quand on observe l'éclat apparent d'un astre, nous n'observons pas l'éclat réel, car la lumière a été atténuée par l'extinction. L'extinction atmosphérique est généralement corrigée au moment de la mesure. Mais l'extinction galactique n'est pas corrigée, car elle dépend de chaque étoile particulière. Il s'ensuit qu'une partie de la lumière est perdue. Cette extinction varie beaucoup d'une étoile à l'autre, car la distribution de la matière absorbante est très inhomogène dans notre Galaxie. Des cartographies de cette extinction ont été faites. Quand une étoile est observée dans une galaxie, autre que la nôtre, il y a aussi une extinction dans cette galaxie-hôte. Cette dernière extinction *ne peut pas être cartographiée et elle est difficile à déterminer*.

Une magnitude corrigée de l'extinction s'écrit :

$$m_c = m - a$$

Dans cette expression,  $a$  est l'extinction (positive) mesurée en magnitude. La magnitude corrigée est plus faible que la magnitude brute. Selon que la magnitude est mesurée en bleu, en jaune ou en infrarouge, l'extinction n'est pas la même. C'est dire que la couleur intrinsèque,  $C$ , d'une étoile change avec l'extinction. On peut dire que les objets absorbés sont plus "rouges", car l'extinction affecte plus le bleu que le rouge. C'est le rougissement interstellaire.

La courbe moyenne d'extinction par des poussières interstellaires classiques, montre que l'excès de couleur est directement proportionnel à l'extinction vraie. Ainsi, pour la lumière bleue on a  $a_b \approx 4E_{B-V}$ , où  $E_{B-V}$  est l'excès de couleur défini par la différence entre la couleur observée et la couleur intrinsèque :

$$E_{B-V} = (B - V) - (B - V)_c$$

D'une manière générale :  $a_\lambda = R_\lambda E_{B-V}$ , où  $R_\lambda$  est une valeur connue pour chaque longueur d'onde (voir le tableau ci-dessous). Pour les Céphéides, quand nous parlons de la couleur  $C$ , il s'agissait de la couleur intrinsèque, qui pour une étoile donnée n'est pas connue. On peut supposer que pour tout un échantillon de Céphéides la couleur intrinsèque moyenne est constante. Le terme en  $C$  rejoint donc la constante additive et on obtient une relation Période-Luminosité, celle généralement présentée dans les livres. Le problème

est que la luminosité et la couleur sont intimement liées par la relation physique. A grande distance, du fait de la sélection en luminosité, on risque d'avoir un échantillon dont la couleur intrinsèque moyenne n'est pas la même que celle de l'échantillon qui a servi à calibrer la relation.

Seule la relation PLC est une vraie relation physique, la relation PL est une relation statistique, très sujette à être affectée par des biais statistiques.

Nom du Filtre	$\lambda_{\text{effective}}$ (nm)	a/a(V)	R=a/E <sub>B-V</sub>
U (UV)	337,2	1,664	5,434
B (Bleu)	440,4	1,321	4,315
V (Visible)	542,8	1,015	3,315
R (Rouge)	650,9	0,819	2,673
I (Infrarouge)	809,0	0,594	1,940
J	1266,0	0,276	0,902
H	1673,2	0,176	0,576
K	2215,2	0,112	0,367
L'	3807,9	0,047	0,153

Nous allons tout d'abord supposer que nous possédons un échantillon de Céphéides non biaisé. En d'autres termes, nous allons supposer que l'échantillon de calibration et l'échantillon distant sont tous deux composés de Céphéides ayant, en moyenne, les mêmes couleurs intrinsèques.

Nous allons voir que nous sommes confrontés à un dilemme. Soit nous utilisons la relation PL et alors, au risque d'avoir un biais statistique, il est possible de corriger complètement l'extinction galactique, y compris celle qui a lieu dans la galaxie hôte ; soit nous utilisons la relation PLC et alors, nous n'avons plus de biais statistique, mais nous avons le risque de mal estimer l'extinction galactique.

### Comment corriger la relation PL de l'extinction totale ?

En effectuant des mesures dans deux bandes photométriques (V et I par exemple), il est possible de corriger de l'extinction qui affecte les mesures. Nous donnons ci-dessous la méthode.

Nous supposons que les relations PL en V et en I s'écrivent :

$$M_V = A_V \log P + B_V$$

$$M_I = A_I \log P + B_I$$

où les A et B sont des constantes déduites de la relation PL de Céphéides de notre Galaxie et de distance connue.

Les modules de distance déduits de V et I s'écrivent :

$$\mu = (m_V - R_V E_{B-V}) - (A_V \log P + B_V)$$

$$\mu = (m_I - R_I E_{B-V}) - (A_I \log P + B_I)$$

Les termes  $R.E_{B-V}$  représentent la correction d'extinction galactique sur les magnitudes apparentes  $m_V$  et  $m_I$ .

Nous avons donc deux équations avec deux inconnues  $E_{B-V}$  et  $\mu$ . On peut résoudre en tirant par exemple  $E_{B-V}$  de la deuxième équation et en reportant dans la première. On trouve alors :

$$\mu = \frac{\mu_V - \frac{R_V}{R_I} \mu_I}{1 - \frac{R_V}{R_I}}$$

où nous avons posé :

$$\mu_V = m_V - (A_V \log P + B_V)$$

$$\mu_I = m_I - (A_I \log P + B_I).$$



Barry Madore et Pekka Teerikorpi

Toutes les quantités sont connues ou mesurables. Le problème de l'extinction a été éliminé. Mais attention, **on reste toujours avec l'hypothèse forte que la couleur intrinsèque des échantillons considérés est constante en moyenne**, quelle que soit la distance de ces échantillons. Cette hypothèse est potentiellement source de biais statistiques. Nous allons voir que nous avons de bonnes raisons de suspecter l'existence d'un tel biais.

En résumé, cette méthode, proposée par le grand astronome canadien Barry Madore, serait totalement satisfaisante en l'absence de biais statistique. Le problème est donc de savoir si le biais, que nous suspectons, existe réellement ou non. C'est ce que nous allons voir maintenant.

### **La loi de Hubble comme outil de détection du biais**

La loi de proportionnalité entre le décalage spectral et la distance, ce qui constitue la loi de Hubble, est bien vérifiée à grande distance. Cette loi est souvent écrite en interprétant le décalage spectral en terme de vitesse, comme un effet Doppler-Fizeau. Elle prend la forme très simple  $v=H.d$ , où  $d$  est la distance,  $v$  la vitesse et  $H$  la constante de Hubble.

Cette loi fonctionne-t-elle encore à plus petite échelle ? Cette question peut être mise à l'épreuve, au moins avec les groupes de galaxies voisins de notre Groupe Local, hébergeant, entre autres, notre Galaxie et la grande galaxie d'Andromède. Alan Sandage fut un des premiers à tester cette loi locale. Son résultat semblait montrer que la loi était toujours valable et qu'elle était même assez peu dispersée autour de la loi de proportionnalité classique. Avec les nouvelles mesures de distances dérivées de la méthode de Barry Madore, il était possible de refaire ce test. Ceci a été fait par deux équipes indépendantes : la première finno-franco-russe avec le travail de Timo Ekholm, Pekka Teerikorpi, Yuri Baryshev et l'auteur. La seconde russe avec le travail de Igor Karachensev et ses collaborateurs.



*Igor Karachensev, l'un des astronomes russes les plus productifs dans le domaine extragalactique.*



*Pekka Teerikorpi (à gauche) et Timo Ekholm en visite à l'Observatoire de Lyon.*

Le résultat a été remarquablement confirmé. La dispersion a même été trouvée plus faible encore que par le passé, de l'ordre de 40 km/s.

Pour trouver un tel résultat, il faut avoir des vitesses radiales et des distances de galaxies proches (en l'occurrence par la relation PL corrigée de l'extinction selon la méthode de B. Madore). Les vitesses radiales doivent être corrigées de différents mouvements locaux : le mouvement par rapport au centre de gravité du Groupe Local et aussi du mouvement de notre Groupe Local par rapport à l'amas Virgo. Ces corrections étant faites, la loi est bien vérifiée.

Le but n'est pas seulement de trouver localement la constante de Hubble (il est préférable de déterminer cette constante à plus grande distance pour avoir la véritable expansion globale). Le résultat intéressant est que la loi  $v=H.d$  fonctionne encore. Cela signifie que si nous mesurons les vitesses radiales (et cela est facile et précis), nous pouvons obtenir les distances relatives, en fixant arbitrairement la constante de Hubble et en nous fiant à la stricte proportionnalité de la loi. La loi de Hubble devient un outil pour avoir des distances, relatives certes, mais extrêmement précises. Ce sont ces distances relatives, qui vont, à l'inverse, nous permettre de tester si la relation PL est biaisée ou non.

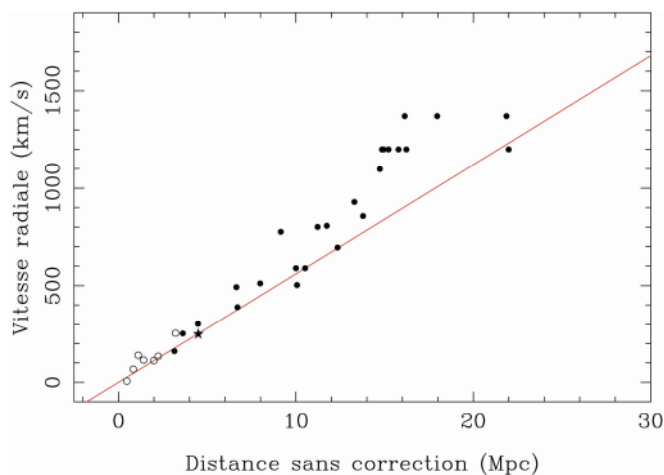
Il peut sembler qu'il y a une certaine "circularité" à procéder ainsi : la relation PL donnant les distances et les distances servant en retour à tester ensuite la relation PL. Il n'en est rien, car la relation PL sert uniquement à vérifier la loi de Hubble locale. C'est en nous appuyant ensuite sur cette loi locale, supposée vraie, que nous pouvons tester, non pas les distances, mais la linéarité de la relation PL.



Si la loi PL se révèle être parfaitement de la forme linéaire  $M=A.\log P + B$ , nous serons convaincus qu'il n'y a pas de biais, et que la couleur moyenne, incorporée dans la constante  $B$ , est constante. Si en revanche la linéarité n'est pas satisfaite, nous serons en droit de suspecter l'existence d'un biais. Il faudra alors trouver un moyen de corriger ce biais.

### Le test de la linéarité de la relation PL

Voici le résultat du test. En supposant une valeur arbitraire de  $H$ , les valeurs  $\log(v/H)$  ont été tracées en fonction des modules de distances tirés, par la méthode de B. Madore, des observations de Céphéïdes de galaxies proches, observations faites à partir du Hubble Space Telescope (HST) en bandes photométriques V et I.



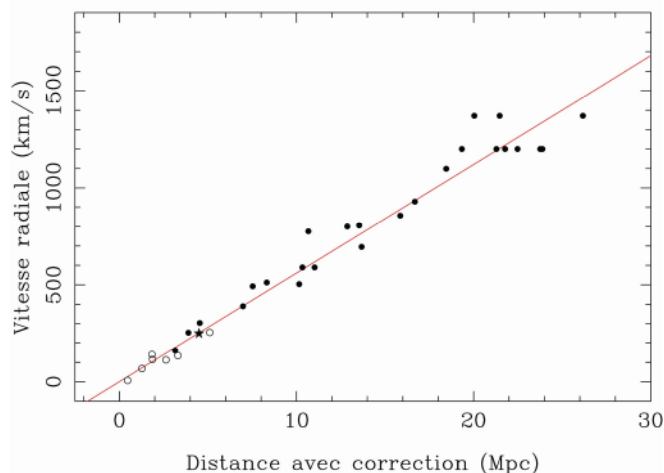
La figure ci-dessus illustre le résultat. En première approximation la loi linéaire est bien satisfaite, mais à petite distance, la linéarité est meilleure, comme si les choses se gâtaient à plus grande distance. Or c'est exactement ce qui se passe quand il y a un biais statistique, car justement le biais intervient à grande distance, quand on commence à perdre certaines Céphéïdes faibles et que la couleur moyenne de notre échantillon de Céphéïdes commence alors se modifier (puisque la magnitude absolue dépend de la couleur comme le montre la véritable relation PLC).

### Comment être sûr qu'il s'agit du biais attendu ?

Il semble donc qu'il puisse y avoir un biais. Mais comment être sûr de cela ? Plusieurs idées ont été testées.

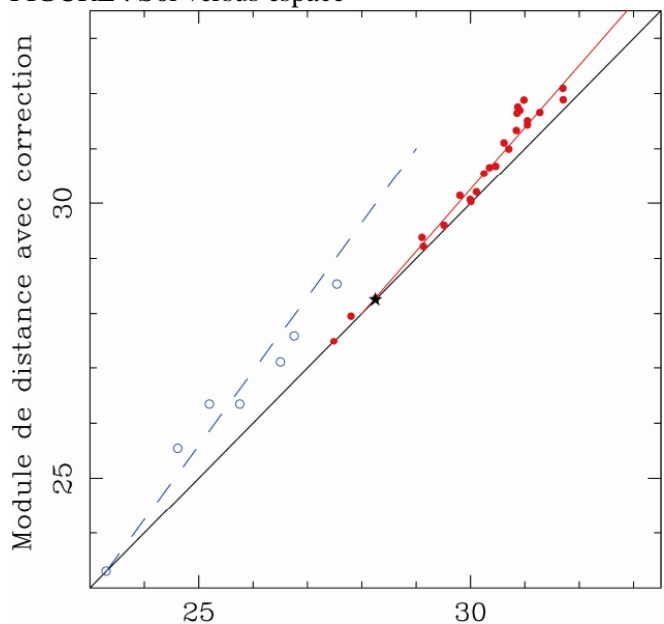
La première idée consiste à modéliser le biais et à appliquer la correction calculée. Or le modèle de ce biais avait été fait, dans un autre contexte, par P. Teerikorpi. Il suffisait donc de l'appliquer. Le

résultat est montré sur la figure ci-dessous. La relation devient linéaire comme attendue.



La deuxième idée qui vient à l'esprit pour tester le biais est de se dire que les observations anciennes devraient montrer un biais plus fort. En effet, les observations faites depuis le sol ne peuvent pas être aussi "profondes" que les observations spatiales. Elles devraient être plus biaisées. Le test a été fait.

FIGURE : Sol versus espace



Module de distance sans correction  
Effet sur les observations faites depuis le sol (cercles blancs) et depuis l'espace (cercles rouges).

La figure ci-dessus montre bien ce qu'on attend. Les observations faites depuis le sol (cercles blancs) sont très tôt biaisées, alors que les observations plus profondes obtenues par l'observation spatiale (cercles rouges), sont également biaisées mais à plus grande distance. Le point figuré par une étoile

noire est une mesure faite depuis le sol, mais avec le VLT. Dans ce cas, la limite de complétude de l'échantillon de Céphéïdes est repoussée plus loin et le biais n'apparaît pas encore.

Le test ultime consiste à utiliser directement la relation PLC, qui, elle, ne doit pas avoir de biais. Cette solution serait parfaite mais, rappelez-vous, nous ne savons pas calculer la couleur intrinsèque d'une Céphéïde. Il faudra faire des concessions pour y parvenir.

### Le test de la relation PLC

Nous devons calculer la couleur intrinsèque de chaque Céphéïde. Il suffit de faire la différence des magnitudes apparentes, en V et en I par exemple, mais en corrigeant de l'extinction chacune d'elles.

$$C = (m_V - R_V E_{B-V}) - (m_I - R_I E_{B-V})$$

Les grandeurs  $R_V$  et  $R_I$  sont connues pour de la matière interstellaire typique (voir le tableau I), mais l'excès de couleur  $E_{B-V}$  dépend de la quantité de matière absorbante qu'il y a entre l'observateur et la Céphéïde. Or justement, cette quantité est inconnue. Peut-on l'estimer ?

### L'extinction galactique

En supposant un modèle tout simple de Galaxie, on peut calculer la longueur traversée par une ligne de visée à une latitude galactique  $b$ :

$$l = \frac{l_o}{\sin b}$$

Avec, pour l'éclairement, une loi d'extinction classique de la forme  $E = E_o e^{-kl}$  on est conduit à une relation en magnitude apparente de la forme :

$$m_{\text{corrigée}} = m_{\text{observée}} - \frac{kl_o}{\sin b}$$

où  $k$  est une constante d'absorption qui ne dépend que de la longueur d'onde. En appliquant cette relation aux deux domaines considérés, par exemple B et V, on peut trouver l'excès de couleur produit par l'observation à une latitude galactique  $b$  :

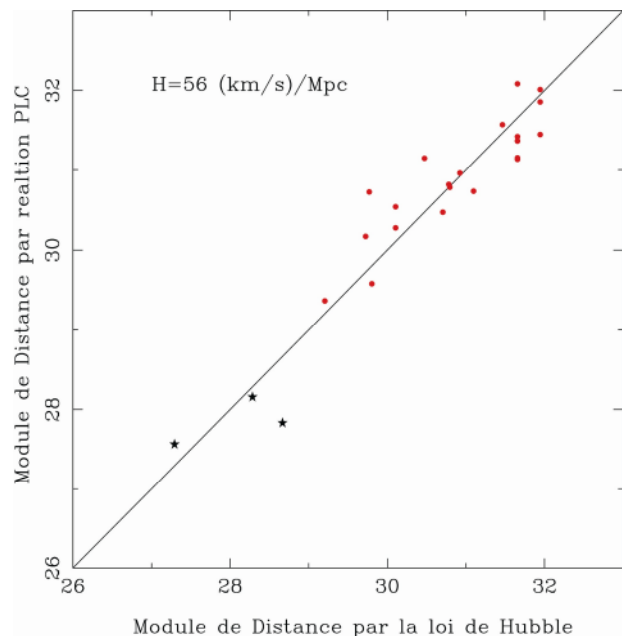
$$E_{B-V} = (k_B - k_V) \frac{l_o}{\sin b}$$

$l_o$  est une constante (différente dans le nord et dans le sud, car notre Soleil n'est pas juste dans le plan galactique). Un modèle plus élaboré prend également en compte les variations de longitudes (notre Galaxie n'est pas un disque à bord parallèle). Les meilleurs modèles actuels prennent en compte toutes les fluctuations locales estimées par des mesures en infrarouge ou en radio.

On peut supposer que c'est la matière absorbante dans notre Galaxie qui produit l'essentiel de l'extinction et que la quantité de matière absorbante dans la galaxie hôte est plus constante. Nous savons corriger de l'extinction due à notre Galaxie. Dit autrement, nous savons calculer l'excès de couleur produit par la traversée de notre Galaxie par la ligne de visée. Cette correction a été modélisée de manière très fine pour chaque direction de visée. En supposant que l'excès de couleur total, celui dont nous avons besoin, est celui produit dans notre Galaxie à une constante additive près, nous avons la possibilité de calculer, à une constante additive près, la couleur intrinsèque de chaque Céphéïde.

En procédant ainsi, nous faisons encore une hypothèse simplificatrice, mais moins forte que celle qui consiste à dire que la couleur intrinsèque moyenne de l'échantillon est constante. De manière concrète, l'excès de couleur  $E_{B-V}$  se calcule comme une fonction de la longitude et de la latitude galactique de la Céphéïde considérée, selon le modèle choisi d'extinction galactique (Voir l'encadré). Faisons le test.

La figure montre, comme précédemment, la quantité  $\log(v/H)$  en fonction de la distance calculée, cette fois-ci, par la relation PLC. Il n'y a plus d'écart à la linéarité. La dispersion est un peu plus grande qu'auparavant, ce qui est normal, car l'extinction n'a été que partiellement corrigée.



*En utilisant la relation Période-Luminosité-Couleur, le biais n'apparaît plus.*

Notre conclusion est que la relation PLC pourrait s'avérer un bien meilleur moyen de mesurer les distances. On peut chercher s'il serait possible de mélanger les deux méthodes (méthode de Barry Madore pour corriger de l'extinction et méthode PLC). C'est sans doute possible en apportant une information supplémentaire, par exemple avec des mesures dans une troisième bande photométrique : B, V, I ou en allant plus loin dans l'infrarouge, pour s'affranchir encore un peu plus de l'extinction. Vous avez tous les éléments pour réfléchir vous-mêmes à ces possibilités qui vous ouvrent les portes de la recherche.

Terminons en donnant les conséquences concrètes que laissent attendre ces résultats. Aujourd'hui, bon nombre d'astronomes considèrent que le problème de la constante de Hubble est résolu et que  $H=72$  (km/s)/Mpc, résultat issu des mesures de Céphéides avec le HST. Si le biais se confirme, la valeur de  $H$  pourrait descendre à une valeur peut-être proche de 60 (km/s)/Mpc. L'avenir nous dira si c'est le cas. En effet, avec l'utilisation de télescopes spatiaux plus gros, ou même de télescopes au sol plus performants, il sera possible de repousser la complétude des échantillons de Céphéides et de reculer la distance où le biais apparaît.

Nous mettons à votre disposition sur le site du CLEA, les échantillons ayant servi aux calculs présentés ici. Ces résultats ont fait l'objet de plusieurs publications dans la revue *Astronomy and Astrophysics*. Il faut attendre le verdict du temps pour savoir si les conclusions sont confirmées, ce qui peut être long. Personnellement, ma conviction est faite, car j'ai vécu la progression des idées et j'ai connu le moment magique, où, tout naturellement, la relation PLC a conduit à une relation de Hubble linéaire (la dernière figure).

## Savez-vous ce qu'est un *conformateur* ?

Le travail d'astronome conduit à s'occuper parfois de choses bien étranges. Timo Ekholm (photo ci-contre) est venu travailler à Lyon, pendant ce qu'on appelle un postdoc. Il avait soutenu sa thèse avec succès et était donc Docteur en Astrophysique. Une cérémonie devait avoir lieu à Helsinki en Finlande pour la remise officielle du diplôme. Pour cette cérémonie un costume était exigé et, comme vous pouvez le voir sur la photo, le costume comportait outre l'épée et la redingote, un chapeau haut de



*Timo Ekholm, un brillant chercheur, en tenue d'apparat.*

forme, à faire faire sur mesure. Timo m'a donc demandé où il pourrait faire prendre ses mesures de forme de tête, afin de donner les instructions au fabricant de son Université. J'ai donc téléphoné pour trouver un chapelier capable de faire

cette mesure. J'ai appris que cette mesure se faisait avec un appareil appelé un *conformateur* et que le résultat était une sorte de tracé ovoïde donnant la forme du crâne. L'appareil lui-même est assez complexe avec une multitude de ressorts (voir figure ci-dessous). Mais personne dans la région n'avait un tel appareil, sauf le musée du chapeau à Chazelles, dans la Loire. Au musée, personne ne savait faire marcher le conformateur. Par chance, à Paris, nous avons pu dénicher l'oiseau rare : un vieux chapelier qui pouvait faire le relevé.

*Photo société DBM, Paris*

Timo profita d'une réunion à Paris pour faire faire la mesure. Vous pouvez admirer le résultat. En France, nous ne savons plus faire les choses avec autant de panache !



Si vous ne saviez pas ce qu'est un conformateur, je vous l'aurai appris et j'espère que vous me pardonneriez cette parenthèse incongrue.

■