

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2008 n° 121

EDITORIAL

Nous inaugurons une présentation nouvelle sensée vous informer rapidement du niveau de difficulté des articles. Le codage est le suivant :
rouge : difficile -
orange : intermédiaire -
vert : facile.

Nous avons fait un effort particulier pour avoir un grand éventail de sujets, depuis les articles de fond, témoignages de la recherche en cours, jusqu'aux questions élémentaires. Nous espérons ainsi que chacun trouvera matière à réfléchir.

Tout en essayant de ne pas négliger l'école élémentaire, nous commençons avec la relation "Période-Luminosité-Couleur", des articles de fond sur des sujets de recherche du moment. L'idée, comme le suggérait Jean-Claude Pecker, est d'aider les enseignants à suivre la recherche en cours. Nous espérons que de jeunes collègues astronomes nous aideront à comprendre les problèmes qui les occupent.

La Rédaction
patu@obs.univ-lyon1.fr

Article de fond

La relation Période-Luminosité-Couleur
G. Patuarel p. 2

Avec nos élèves

Le limite de Roche revisitée
B. Bernard, G. Laval, L. Moulin p. 10

Curiosité

Les logarithmes, la règle à calcul et les méthodes d'autrefois
G. Patuarel p. 12

Avec nos élèves

Poèmes astronomiques
Jean de la Fontaine et P. Sonio p. 17

Observation

Hauteur de Lune
Ch.-H. Eyraud p.18

Avec nos élèves

Essai de détermination de la distance d'une nébuleuse planétaire par photométrie
J. Jamon, A. Lamiable, N. Laporte, F. Toporenko, G. Bouteville p. 24

Questions d'enfants

Pourquoi les étoiles et la Lune brillent-elles ?
G. Patuarel, J. Ripert, F. Billard p. 26

Réalisation

Le parallaxomètre de "Bardin"
Bardin et les stagiaires de l'EEA 2007 p. 27

Avec nos élèves

Convergence : L'équation d'un miroir parfait
G. Patuarel p. 30

Avec nos élèves

Mes représentations au début du projet d'astronomie
A. Hornero, N. Guillaud-Magnin p. 33

Rubriques fixes

Remue-méninges
Lecture pour la marquise
La vie associative
Le courrier des lecteurs



Photo Ph. Merlin
La calculette de poche en 1960.
Voir l'article page 12.

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 " κ -mécanisme". Nous allons tenter de l'expliquer simplement.

Le κ -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 κ 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 que¹ :

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

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 :

¹ 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)².

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

² 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 α , β et γ 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_λ 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. À 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 _{B-V} |
|----------------|-----------------------------------|--------|----------------------|
| 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 μ . 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.

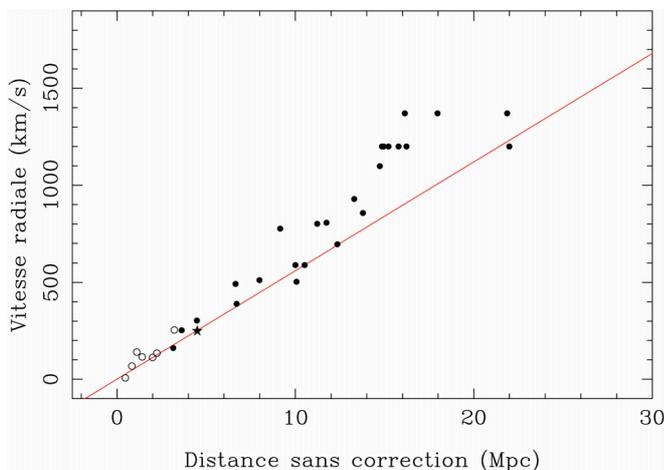
Le but n'est pas seulement de trouver localement la constante de Hubble (il est préférable de déterminer cette constante à plus grande distance pour avoir la véritable expansion globale). Le résultat intéressant est que la loi $v=H.d$ fonctionne encore. Cela signifie que si nous mesurons les vitesses 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 $M=A.logP + B$, 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.



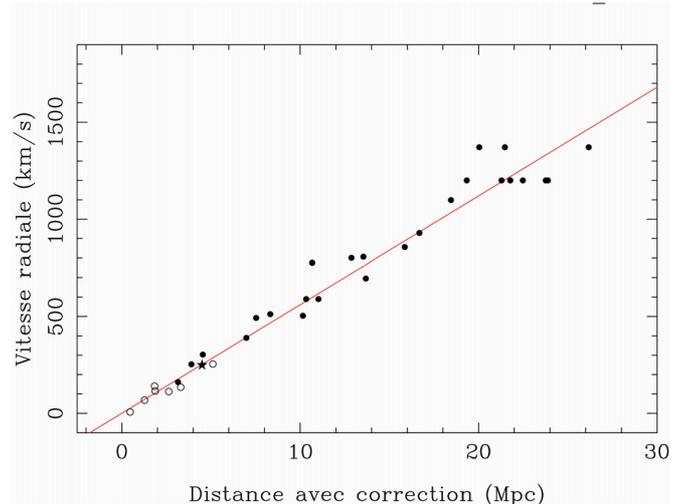
La figure ci-dessus illustre le résultat. En première approximation la loi linéaire est bien satisfaite, mais à petite distance, la linéarité est meilleure, comme si les choses se gâtaient à plus grande distance. Or c'est exactement ce qui se passe quand il y a un biais statistique, car justement le 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.

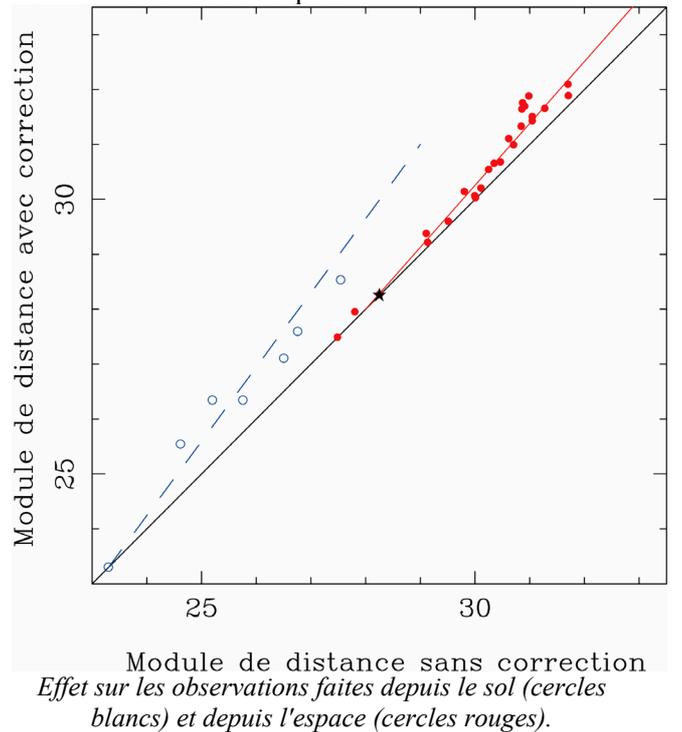
La première idée consiste à modéliser le biais et à appliquer la correction calculée. Or le modèle de ce biais avait été fait, dans un autre contexte, par P. Teerikorpi. Il suffisait donc de l'appliquer. Le

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



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 Céphéides 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 Céphéide. Il faudra faire des concessions pour y parvenir.

Le test de la relation PLC

Nous devons calculer la couleur intrinsèque de chaque Céphéide. 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 Céphéide. 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 :

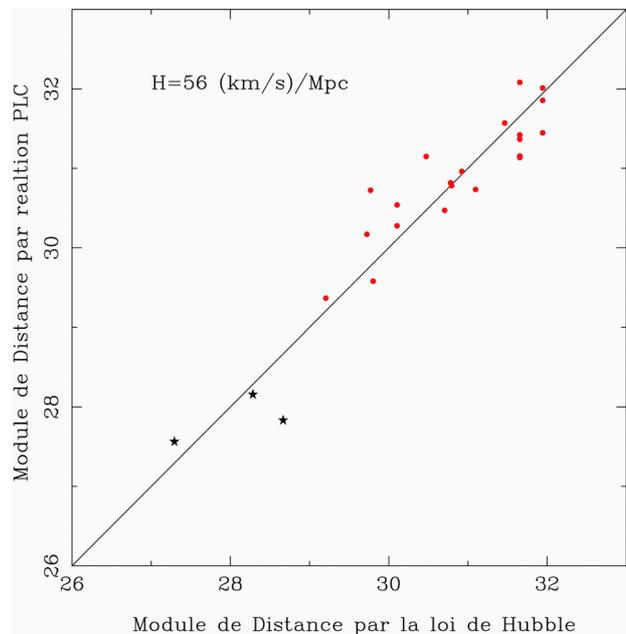
$$E_{B-V} = (k_B - k_V) \frac{l_o}{\sin b}$$

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 Céphéide.

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 Céphéide 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.

■

La limite de Roche revisitée

Benjamin BERNARD, Gauthier LAVAL, Loïc MOULIN
TIPE, Lycée Claude-Fauriel de Saint-Etienne

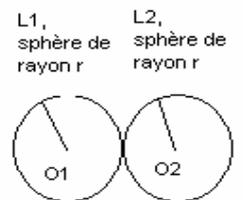
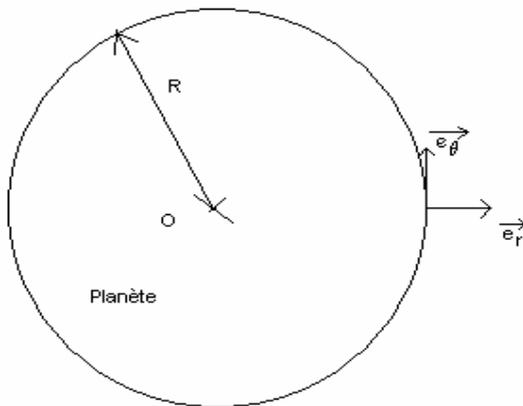
Résumé. Dans un article précédent nous avons parlé des effets de marée et de la limite de Roche. Nous avons donné une estimation de l'expression de cette limite, qui est la limite théorique de stabilité d'un corps gravitant autour d'un autre. En dessous de cette limite le corps ne peut plus garder sa cohésion du simple fait de la gravité. Notre calcul était très approximatif et nous n'avions pas pu trouver une façon de simplifier le calcul réel, très complexe. Un facteur numérique de 2,456 intervient dans l'expression réelle, nous n'avions pu faire mieux que de trouver la valeur très approchée de 1,26. Un "trinôme" du Lycée Claude-Fauriel de Saint-Etienne a trouvé une méthode très astucieuse qui permet de trouver un résultat remarquable, par une méthode simple.

Introduction

C'est en s'intéressant aux anneaux de Saturne que Edouard Roche (1820-1883) commença à penser, en 1848-49, à ce que sera la « Limite de Roche ». Cette limite marque la distance minimale théorique d'existence de gros satellites. En deçà le satellite pourrait se fragmenter en anneaux (voir l'encadré, à la fin de l'article).

La valeur de cette limite acceptée aujourd'hui est : $D = 2,456(\rho_M/\rho_m)^{1/3} \cdot R$

Avec : ρ_M la masse volumique de la planète, ρ_m la masse volumique du satellite considéré et R le rayon de la planète. Pour réussir à obtenir ce résultat il faut faire des calculs assez complexes, or on peut trouver un résultat semblable avec des calculs plutôt simples.



Satellite semblable à deux sphères L1 et L2 identiques.

D distance entre le centre de la planète et celui de son satellite.

Il faut approximer le satellite considéré à deux sphères semblables, de rayon $\frac{1}{4}$ de celui du satellite considéré et de masse $\frac{1}{2}$ de la masse totale du satellite.

La planète exerce donc une force gravitationnelle sur L_1 et une sur L_2 on obtient de cette manière (en norme) :

$$F_1 = F(\text{Planète}/L_1) = G M m / (D-r)^2$$

$$F_2 = F(\text{Planète}/L_2) = G M m / (D+r)^2$$

Avec M la masse de la planète, m la masse de la sphère L_1 et L_2 soit $\frac{1}{2}$ de la masse du satellite en entier. G est la constante gravitationnelle.

Les deux sphères L_1 et L_2 seront donc soumises à une force résultante T qui tend à les séparer :

$$T = F_1 - F_2 = G M m (4rD / (D^2 - r^2)^2)$$

Or on a $D \gg r$. On peut donc négliger r devant D
 T devient donc :

$$T = 4GMmr / D^3$$

Il existe une force de cohésion des deux sphères

$$F_c = Gm^2 / 4r^2$$

Il y a donc séparation des deux masses si $T > F_c$

On trouve ainsi $D < (16Mr^3 / m)^{1/3} = D'$

Remplaçons M par ρ_M la masse volumique de la planète et m par ρ_m la masse volumique du satellite donc des deux sphères.

On a :

$$\rho_M = M / \text{volume} = 3M / 4\pi R^3$$

$$\rho_m = m / \text{volume} = 3m / 4\pi r^3$$

En remplaçant dans D' on obtient :

$$D' = 2,52 \cdot (\rho_M / \rho_m)^{1/3} \cdot R$$

Soit une très bonne approximation de la véritable limite calculée par Roche.

Au-delà de cette distance le satellite ne risque pas d'exploser, en deçà le satellite subit une force résultante T qui tend à le séparer, plus importante que la force de cohésion qui permet de la faire tenir en un seul morceau, donc le satellite explose, en théorie. D' est donc une approximation de ce qui est appelé aujourd'hui la « Limite de Roche ».

■

Pourquoi Phobos n'explose-t-il pas ?

On peut montrer que Phobos gravite autour de Mars à une distance inférieure à la limite de Roche. De fait, Phobos subit des effets de marée extrêmement forts. Il est très allongé, mais il est bien solide et il n'explose pas. La limite de Roche serait-elle une notion erronée ?

En fait, la limite de Roche est la limite à laquelle un corps se disperserait par effet de marée, si sa cohésion n'était assurée que par la gravitation, une sorte de satellite fluide, sans cohésion matérielle. Ce n'est pas le cas pour un corps solide. André Brahic m'a fait remarquer malicieusement que nous-mêmes, qui subissons en permanence des effets de marées (la gravité est plus forte pour nos pieds que pour notre tête) et qui sommes en deçà de la limite de Roche, sommes malgré tout bien cohérents (au sens structurel).

On comprend pourquoi la méthode de nos trois auteurs fonctionne. Ils étudient la solidité de la cohésion d'un satellite coupé en deux quand les deux morceaux ne sont maintenus entre eux que par la gravitation. Il fallait y penser !

GP

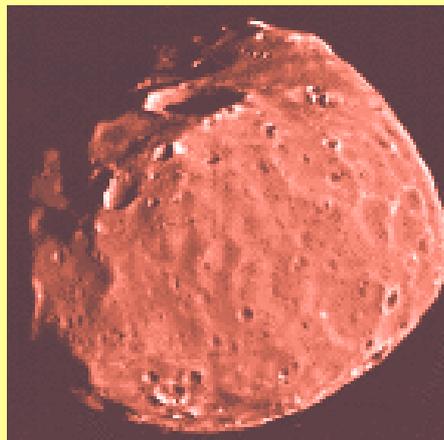


Photo NASA.

Phobos, le petit satellite de Mars, a un diamètre d'une vingtaine de kilomètres seulement.

CURIOSITÉS

Les logarithmes, la règle à calcul et les méthodes d'autrefois.

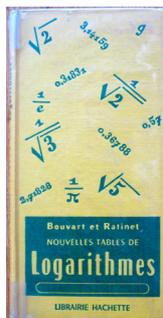
G. Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : En l'espace d'une quarantaine d'années, les méthodes et les moyens de calcul ont changé plus qu'en plusieurs siècles auparavant. Nous voudrions retracer brièvement cette évolution, ce qui nous donnera l'occasion de parler des logarithmes, si utiles en astrophysique, et des moyens de calcul d'autrefois, pour faire sourire ou s'apitoyer la jeune génération.

Mon premier souvenir sur les "log" date du jour où mon frère aîné, revenant d'un cours de mathématiques, m'annonça : "Avec les logarithmes, on transforme les multiplications en additions". Quelle aubaine pour un élève paresseux !

Effectivement, la fonction logarithme possède la remarquable propriété suivante :

$$\log a + \log b = \log(ab)$$



À cette époque, les calculettes n'existaient pas et nous utilisions des tables qui donnaient les logarithmes décimaux (il existe d'autres types de logarithme), dont la célèbre table "Bouvard et Ratinet". Je ne résiste pas au plaisir de vous montrer cette petite table jaune en photo, pour les nostalgiques.

Quand vous vouliez trouver le logarithme décimal d'un nombre, vous deviez compter le nombre de chiffres significatifs moins un pour constituer la *caractéristique* et ensuite vous cherchiez dans la table la *mantisse* correspondant aux chiffres significatifs de votre nombre. Le groupement des deux donnait le log.

Donnons un exemple, en cherchant le logarithme décimal de 123,4. La caractéristique est 2 car le nombre, supérieur à un, possède 3

chiffres. Dans la table on trouve la mantisse de 1234, qui est : 09132. On trouve donc que $\log(123,4)=2,09132$.

Si vous vérifiez sur l'image du contenu de la table, vous découvrirez un piège. Si le résultat est marqué d'une petite étoile, il faut prendre le début de la série suivante. Par exemple, pour 1234 vous pourriez, par erreur, dire que le résultat est 08132. Eh bien non ! c'est 09132. Je vous passe l'utilisation des petites tables d'interpolation pour ne pas devenir ennuyeux.

| A4 | A3 | N | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|----|------|-----|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1 | 4,4 | 100 | 00 | 000 | 043 | 087 | 130 | 173 | 217 | 260 | 303 | 346 | 389 |
| 2 | 8,8 | 1 | 432 | 475 | 518 | 561 | 604 | 647 | 689 | 732 | 775 | 817 | |
| 3 | 13,2 | 2 | 860 | 903 | 945 | 988 | *030 | *072 | *115 | *157 | *199 | *242 | |
| 4 | 17,6 | 3 | 01 284 | 326 | 368 | 410 | 452 | 494 | 536 | 578 | 620 | 662 | |
| 5 | 22,0 | 4 | 703 | 745 | 787 | 828 | 870 | 912 | 953 | 995 | *036 | *078 | |
| 6 | 26,4 | 5 | 02 119 | 160 | 202 | 243 | 284 | 325 | 366 | 407 | 449 | 490 | |
| 7 | 30,8 | 6 | 531 | 572 | 612 | 653 | 694 | 735 | 776 | 816 | 857 | 898 | |
| 8 | 35,2 | 7 | 938 | 979 | *019 | *060 | *100 | *141 | *181 | *222 | *262 | *302 | |
| 9 | 39,6 | 8 | 03 342 | 383 | 423 | 463 | 503 | 543 | 583 | 623 | 663 | 703 | |
| 10 | 44 | 9 | 743 | 782 | 822 | 862 | 902 | 941 | 981 | *021 | *060 | *100 | |
| 11 | 4,2 | 110 | 04 139 | 179 | 218 | 258 | 297 | 336 | 376 | 415 | 454 | 493 | |
| 12 | 8,4 | 1 | 532 | 571 | 610 | 650 | 689 | 727 | 766 | 805 | 844 | 883 | |
| 13 | 12,6 | 2 | 922 | 961 | 999 | *038 | *077 | *115 | *154 | *192 | *231 | *269 | |
| 14 | 16,8 | 3 | 05 308 | 346 | 385 | 423 | 461 | 500 | 538 | 576 | 614 | 652 | |
| 15 | 21,0 | 4 | 690 | 729 | 767 | 805 | 843 | 881 | 918 | 956 | 994 | *032 | |
| 16 | 25,2 | 5 | 06 070 | 108 | 145 | 183 | 221 | 258 | 296 | 333 | 371 | 408 | |
| 17 | 29,4 | 6 | 446 | 483 | 521 | 558 | 595 | 633 | 670 | 707 | 744 | 781 | |
| 18 | 33,6 | 7 | 819 | 856 | 893 | 930 | 967 | *004 | *041 | *078 | *115 | *151 | |
| 19 | 37,8 | 8 | 07 188 | 225 | 262 | 298 | 335 | 372 | 408 | 445 | 482 | 518 | |
| 20 | 42 | 9 | 555 | 591 | 628 | 664 | 700 | 737 | 773 | 809 | 846 | 882 | |
| 21 | 4,6 | 120 | 918 | 954 | 990 | *027 | *063 | *099 | *135 | *171 | *207 | *243 | |
| 22 | 9,2 | 1 | 08 279 | 314 | 350 | 386 | 422 | 458 | 493 | 529 | 565 | 600 | |
| 23 | 13,8 | 2 | 636 | 672 | 707 | 743 | 778 | 814 | 849 | 884 | 920 | 955 | |
| 24 | 18,4 | 3 | 991 | *026 | *061 | *096 | *132 | *167 | *202 | *237 | *272 | *307 | |
| 25 | 23,0 | 4 | 09 342 | 377 | 412 | 447 | 482 | 517 | 552 | 587 | 621 | 656 | |

Un petit détail quand même : quand le nombre est inférieur à un, le log est négatif. On

faisait le calcul en suivant une recette à base de cologarithme et de mantisse surlignée... il aurait été plus simple de multiplier le nombre par une puissance de 10 et de retrancher, in fine, le log de cette puissance. Par exemple : $\log(0,01234) = \log(123,4) - \log(10000)$, d'autant que $\log(10000)$ est facile à connaître, sans même consulter la table Bouvard et Ratinet, comme nous allons le voir.

Quelques propriétés du log décimal

En astronomie ce sont les logarithmes décimaux qui sont utilisés, par exemple pour définir les magnitudes.

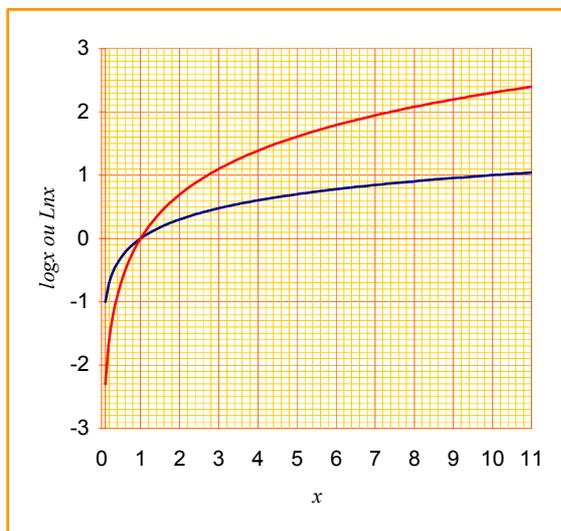
Les fonctions log ont deux propriétés fondamentales: celle vue en introduction :

$$\boxed{\log a + \log b = \log(ab)} \quad (1)$$

et

$$\boxed{\log 1 = 0} \quad (2)$$

On le voit immédiatement sur la figure ci-dessous, qui présente deux sortes de fonction log.



Courbes des log décimaux (en bleu) et népériens (en rouge)

De ces propriétés il découle simplement que :

$$\log a^2 = \log(a.a) = \log a + \log a = 2 \log a$$

En répétant ce processus on trouve une autre propriété générale :

$$\boxed{\log a^n = n \log a} \quad (3)$$

On a aussi une dernière propriété intéressante :

$$\log \frac{a}{a} = 0 = \log a + \log \frac{1}{a}$$

D'où l'on tire évidemment que :

$$\boxed{\log \frac{1}{a} = -\log a} \quad (4)$$

Ce qui montre au passage que la propriété (3) est valable pour n négatif.

Les logarithmes décimaux qui jouissent de la propriété supplémentaire :

$$\boxed{\log 10 = 1} \quad (5)$$

Dont on tire, par la relation (3), les log particuliers suivants :

$$\log 100 = 2$$

$$\log 1000 = 3$$

$$\log 10000 = 4$$

etc...

Les logarithmes népériens

Les logarithmes, dit népériens (notés ln ou Ln), obéissent à la relation :

$$Ln(e) = 1$$

où $e = 2,71828...$

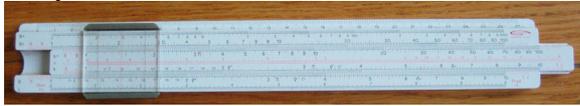
On passe très facilement d'un logarithme à l'autre avec la relation :

$$\log x = \frac{Ln(x)}{Ln(10)} \approx 0,4343 Ln x$$

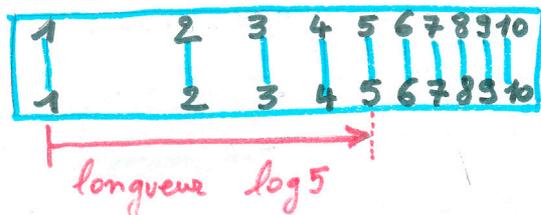
Avec les cinq propriétés numérotées, vous pouvez tout comprendre des subtilités astronomiques sur les magnitudes. Nous y reviendrons un peu plus loin. Pour l'instant nous allons nous intéresser à une vieille dame : "la règle à calcul".

La règle à calcul

Avant les calculettes, ou même les premières machines mécaniques à manivelle, les calculs étaient effectués à la main et à la règle à calcul. Le principe de cette règle magique est facile à comprendre.



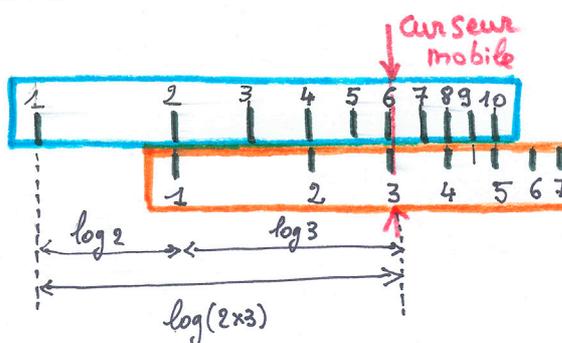
Imaginez une règle dont les positions des graduations 1, 2, 3 ...10, sont proportionnelles aux logarithmes de 1, 2, 3 etc.. La règle ressemblerait à ceci :



Quand nous pointons la valeur x sur les graduations, la longueur entre l'origine et cette graduation est $\log x$, en unité arbitraire.

Si nous mettons deux telles réglettes côte à côte, l'une fixe et l'autre mobile (au centre sur une vraie règle à calculer), on peut faire la somme de deux log, $\log x + \log y$. C'est tout simple : on place l'origine (qui est graduée "1" puisque $\log 1 = 0$) de la réglette mobile sur la graduation x de la réglette fixe. La longueur entre l'origine de la première réglette et la graduation y sur la deuxième réglette est $\log x + \log y = \log xy$.

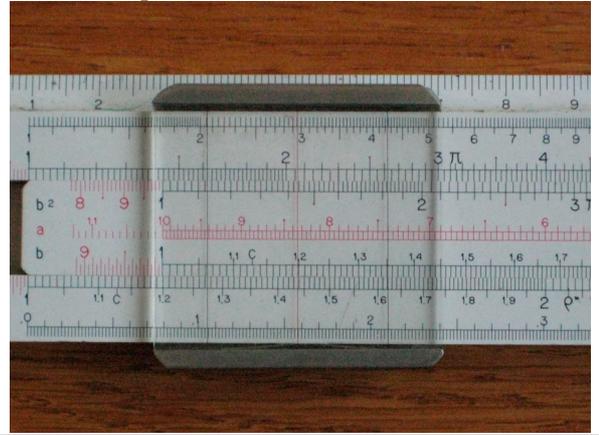
Bien, me direz-vous, mais comment avoir la valeur xy ? Là encore c'est tout simple. Si je place un curseur sur la valeur y de la deuxième réglette, ce curseur correspondra à la graduation xy de la première réglette. C'est le résultat cherché.



Nous constatons que 2 fois 3 donnent, à peu près, 6.

Passons à la pratique

Essayez de calculer, avec l'image ci-dessous, le résultat du produit 12 fois 12.



Essayez d'imaginer la procédure pour faire une division : c'est exactement le contraire : on place le curseur sur le dividende, on fait coïncider le diviseur avec ce même curseur en déplaçant la réglette mobile. Le résultat se lit en face de l'origine de la réglette mobile (le 1 de la réglette mobile). Vous comprendrez qu'il est très rapide d'enchaîner multiplication (A.C) et division (A.C)/B.

Plus la règle à calculer est longue, plus elle est précise. Certains fabricants ont eut l'idée de faire des règles circulaires, comme cette "montre à calcul", qu'un collègue (Ph. Merlin) m'avait rapportée d'URSS. Il y a eu une "règle" enroulée en hélice sur un cylindre. J'avais même imaginé une règle sur un film souple enroulé.



La montre à calculer russe

Les calculs de grand-papa

Je vais vous parler d'un temps que les moins de vingt ans ne peuvent pas connaître. Quand j'ai été recruté à l'Observatoire de Lyon, une de mes premières tâches consistait à faire et à "réduire" des observations de photométrie photoélectrique. Je ne vais pas détailler le sujet ici, mais sachez simplement que lors de la mesure nous utilisons un enregistreur à plume, dont la déviation était proportionnelle à l'éclairement mesuré. Il fallait travailler par nuits claires pour que l'extinction atmosphérique soit bien stable. Comment juger de cette stabilité ?

La précision visée devait être de quelques centièmes de magnitude. Quelle devait être la stabilité du signal ? Eh ! bien, par la bienveillance des logarithmes décimaux, il suffisait que le signal de la plume ait une stabilité de 1%. Expliquons-en la raison.

La magnitude est définie, à une constante additive près, par $m = -2,5 \log E$, où E est l'éclairement mesuré (déviation de la plume). Le "log" utilisé est un logarithme décimal. La variation de m est alors (voir l'encadré) :

$$|\Delta m| = 2,5 |\Delta \log E| = 2,5 \times 0,4343 |\Delta E/E| \approx |\Delta E/E|$$

Pour atteindre la précision de 0,01 magnitude, il suffisait que la stabilité du signal soit bonne à 1%, ce qui se calcule très facilement.

Propriété de dérivation

Une propriété fondamentale, à la base même de la définition du Logarithme népérien est que, sur $]0 ; +\infty[$, la primitive, nulle en 1, de $1/x$ est $\text{Ln}x$. Dit d'une autre façon :

$$\frac{d\text{Ln}x}{dx} = \frac{1}{x}$$

Ce qui conduit aussi à :

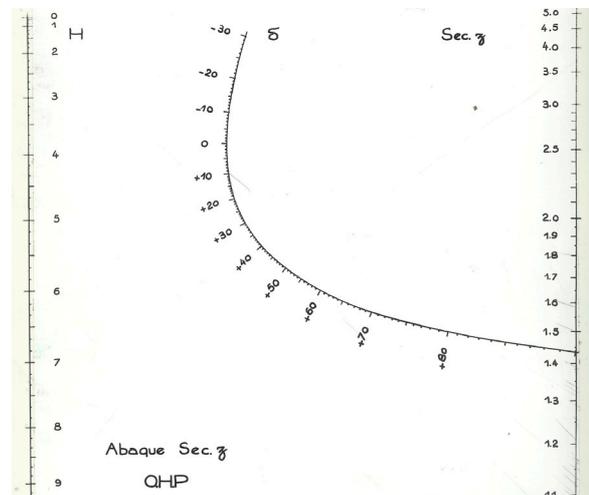
$$\frac{\Delta x}{x} = \Delta \text{Ln}x \approx \frac{\Delta \log x}{0,4343}, \text{ car}$$

$$\log x = \frac{\text{Ln}(x)}{\text{Ln}(10)} \approx 0,4343 \text{ Ln}x$$

Oublier ce facteur 0,4343 dans la dérivation des magnitudes, définies par des logarithmes décimaux, est une erreur fréquente.

Un autre calcul revenait souvent dans cette réduction de données : la fameuse fonction $2,5 \log$. Pour elle nous avons des tables numériques.

Pour le calcul de la distance zénithale nous avons un abaque, afin d'éviter la résolution fastidieuse des triangles sphériques (voir l'article CC117, p2).



Enfin, parfois nous pouvions avoir des résolutions de triangles sphériques. Les calculs devaient être précis. La table *Bouvard et Ratinet* aurait été insuffisante. Nous utilisons la non moins célèbre table Schrön, à neuf décimales, qui donnait, entre autres fonctions, les log des sinus, des cosinus. Les produits de fonctions trigonométriques se calculaient ainsi, comme mon grand frère me l'avait appris, en transformant les multiplications en addition.

L'ère électronique

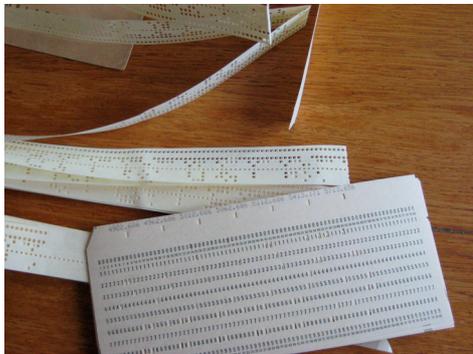
La première machine électronique qui nous fit rêver, mes collègues et moi-même, ce fut une calculette de plus d'un kilogramme, faisant électroniquement les quatre opérations et même la racine carrée. Mais ce bijou, inaccessible aux jeunes astronomes, fut vite supplanté par un autre, encore plus merveilleux, mais tout aussi inaccessible, la calculette classique de nos jours, avec, bien sûr, toutes les fonctions trigonométriques. Faute de pouvoir nous acheter ces merveilles, étions-nous à ce point démunis pour les calculs ? Non, car nous avons déjà des ordinateurs superpuissants. Je vais vous en parler immédiatement.

Quand j'ai été engagé, l'Observatoire de Lyon venait justement d'acheter un supercalculateur PDP8S. Les esprits malicieux disaient que le S signifiait "slow" (lent). Le 8 signifiait 8K, taille de la mémoire à tores de ferrite. Dans ces 8K, nous devons loger le système (l'équivalent du

DOS) et les programmes que nous écrivions en un langage oublié, le FOCAL. Qui parle encore le FOCAL de nos jours ? sans doute peu de monde. C'est une langue morte. Ce langage était en fait un BASIC très rudimentaire, qui ne connaissait, dans la version de base, que les variables numériques.

Avec si peu de mémoire, l'écriture de programmes relevait du tour de force. Dès qu'une variable ne servait plus, il fallait la réutiliser pour autre chose, ce qui rendait les programmes particulièrement illisibles.

"Et la mémoire de masse ?", me direz-vous. Il n'y avait pas encore de disque dur. Les programmes, une fois mis au point, étaient imprimés sur des rubans perforés, ultérieurement remplacés par les cartes perforées.



Un lecteur attaché au *télétype*, sorte de machine à écrire "à boule", d'une vitesse de frappe impressionnante (10 caractères par seconde !), permettait de recharger en mémoire les programmes antérieurs, ou même de lire des données, saisies directement sur ruban à l'aide du *télétype*.

Les performances de la machine vous surprendraient. Pour faire un calcul des moindres carrés, avec une dizaine de points, il fallait pas moins d'une minute... Le S était peut-être bien justifié.

Nous étions pourtant très heureux d'avoir ce puissant moyen de calcul. Je me souviens avoir lu, à cette même époque, un article de Jean-Claude Pecker, d'une génération avant la mienne, qui déclarait que le modèle qu'il présentait lui avait demandé vingt heures de calculs manuels (je crois qu'il s'agissait de modèles d'atmosphère stellaire).

Le premier disque dur qui équipa ce calculateur devait avoir une capacité d'une centaine de kilo-octets. Mais les progrès furent fulgurants ; dix ans plus tard, le disque dur de

notre nouvelle machine affichait 10 méga-octets ; 10 ans encore et nous passions à 1 giga-octets pour, aujourd'hui, dix ans plus tard encore, arriver à un demi-téraoctet.

Encore les logarithmes

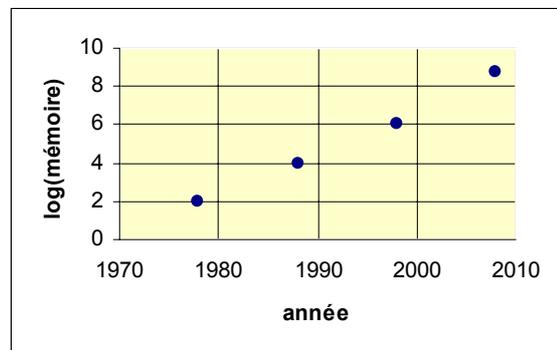
Où s'arrêtera cette croissance fulgurante ? Il est sans doute possible de répondre. En effet, cette croissance est exponentielle. Ce sens est très précis. Il signifie que l'accroissement par unité de temps est fonction de la valeur du moment. Plus la valeur est grande, plus l'accroissement à venir sera grand. En termes mathématiques, cela signifie que l'accroissement Δx pour un intervalle de temps Δt est proportionnel à x . Ce qui s'écrit : $\Delta x = k x \Delta t$

$$\text{C'est-à-dire : } \frac{\Delta x}{x} = k \Delta t$$

En intégrant ce résultat on trouve que si x a une croissance exponentielle, il suit la loi¹ :

$$Lnx = \alpha.t + \beta, \text{ où } \alpha \text{ et } \beta \text{ sont deux constantes.}$$

Si la taille des mémoires de masse (disque dur) des ordinateurs croît de manière exponentielle, quelle sera la taille des mémoires dans dix ans ?



La loi trouvée (dite de Moore - cf "*L'intelligence et le calcul*" de J.-P. Delahaye, chez Belin, *Pour la science*, 2002) est représentée à peu près par l'équation : $\log(\text{mémoire})=0.22(t-1970)$. En 2018 $\log(\text{mémoire})$ vaudra donc 10,56 d'où une mémoire de 36 téraoctets.

Si vous avez des données plus précises, refaites cet exercice, par exemple pour les diamètres des télescopes. G. de Vaucouleurs s'y était amusé, il y a longtemps !

■

¹ Cette relation peut s'écrire : $x = \exp(\alpha t + \beta)$, qui est la loi mathématique exponentielle.

AVEC NOS ÉLÈVES

C'est une idée de Paul Sogno, ancien président de la Société Astronomique de Lyon et grand astronome amateur, que de publier de temps en temps une poésie ayant trait à l'astronomie. Il a sélectionné quelques poèmes. Nous commençons par ce texte remarquable de Jean de La Fontaine. On découvre un poète qui sait regarder avec son intelligence plus qu'avec son œil.

UN ANIMAL DANS LA LUNE

Pendant qu'un philosophe assure
Que toujours par leurs sens les hommes sont
dupés,
Un autre philosophe jure
Qu'ils ne nous ont jamais trompés.
Tous les deux ont raison, et la philosophie
Dit vrai, quand elle dit que les sens tromperont
Tant que sur leur rapport les hommes jugeront ;
Mais aussi si l'on rectifie
L'image de l'objet sur son éloignement,
Sur le milieu qui l'environne,
Sur l'organe et sur l'instrument,
Les sens ne tromperont personne.
La nature ordonna ces choses sagement :
J'en dirai quelque jour les raisons amplement.
J'aperçois le Soleil ; quelle en est la figure ?
Ici-bas ce grand corps n'a que trois pieds de tour :
Mais si je le voyais là-haut dans son séjour,
Que serait-ce à mes yeux que l'œil de la nature ?
Sa distance me fait juger de sa grandeur ;
Sur l'angle et les côtés ma main la détermine ;
L'ignorant le croit plat, j'épaissis sa rondeur ;
Je le rends immobile, et la terre chemine.
Bref je démens mes yeux en toute sa machine.
Ce sens ne me nuit point par son illusion.
Mon âme en toute occasion
Développe le vrai caché sous l'apparence.
Je ne suis point d'intelligence
Avec que mes regards peut-être un peu trop
prompts,
Ni mon oreille, lente à m'apporter les sons.

Quand l'eau courbe un bâton, ma raison le
redresse :
La raison décide en maîtresse.
Mes yeux, moyennant ce secours,
Ne me trompent jamais, en me mentant toujours.
Si je crois leur rapport, erreur assez commune,
Une tête de femme est au corps de la lune.
Y peut-elle être ? Non. D'où vient donc cet objet ?
Quelques lieux inégaux font de loin cet effet.
La Lune nulle part n'a sa surface unie :
Montueuse en des lieux, en d'autres aplanie,
L'ombre avec la lumière y peut tracer souvent
Un homme, un bœuf, un éléphant.
Naguère l'Angleterre y vit chose pareille.
La lunette placée, un animal nouveau
Parut dans cet astre si beau ;
Et chacun de crier merveille :
Il était arrivé là-haut un changement
Qui présageait sans doute un grand événement.
Savait-on si la guerre entre tant de puissances
N'en était point l'effet ? Le Monarque accourut :
Il favorise en roi ces hautes connaissances.
Le monstre dans la lune à son tour lui parut.
C'était une souris cachée entre les verres :
Dans la lunette était la source de ces guerres.
On en rit. Peuple heureux, quand pourront les
François
Se donner comme vous entiers à ces emplois ?
....

Jean de La Fontaine

Au fil des perles des enseignants, des astronomes et des autres

Quelques jours avant le baccalauréat de français, un élève de première à qui on demandait ce qu'il aimait comme textes, répondit : Les fables de la fontaine de Victor Hugo !

OBSERVATION

Hauteur de Lune

Charles-Henri Eyraud, INRP -Lyon

Résumé : *A l'aide d'une maquette et de graphique on essaye de comprendre pourquoi la Lune apparaît à des hauteurs différentes selon les saisons. Tout d'abord, on montre que le phénomène se manifeste même en supposant que la Lune reste dans le plan de l'écliptique. On considère ensuite le cas réel avec le plan de l'orbite lunaire incliné de 5° par rapport au plan de l'écliptique.*

Le mercredi 3 octobre 2007, la Lune était en dernier quartier. Dans l'hémisphère Nord, elle était alors particulièrement haute¹ par rapport à l'horizon. Pourquoi ?

En effet, à 5h37 T.U, lors de son passage au méridien à Paris, la hauteur de la Lune était : $68^\circ 53'$



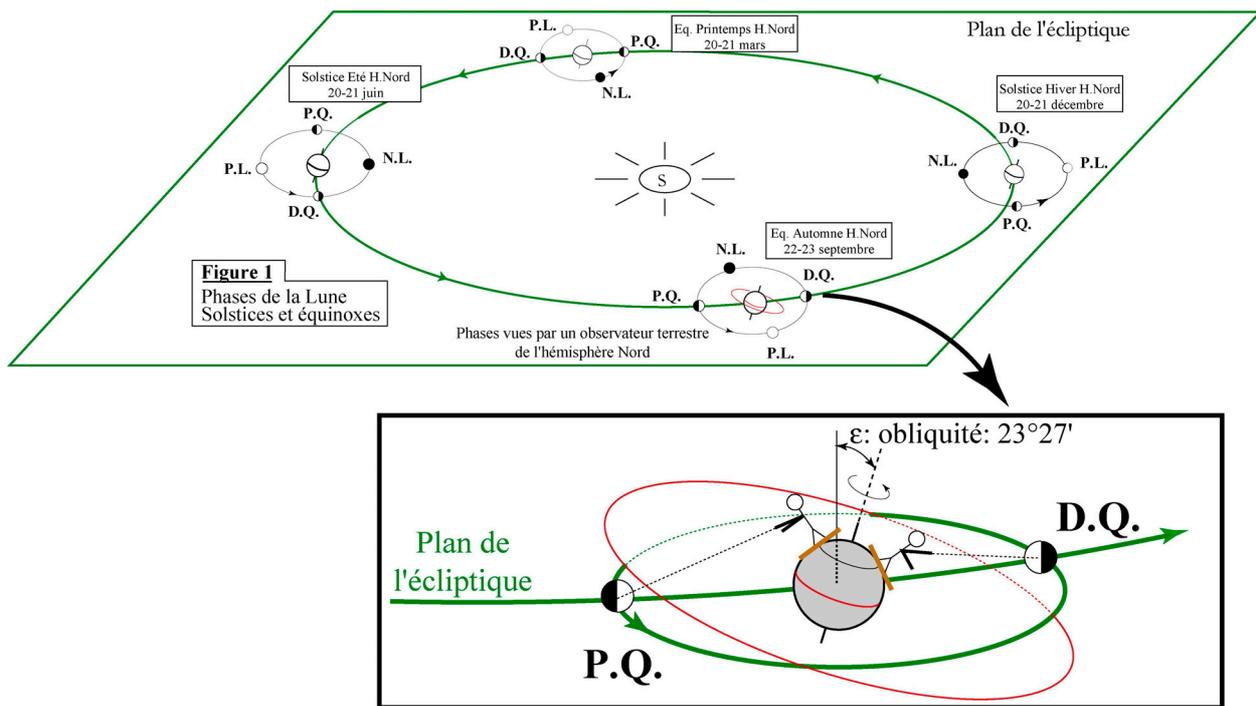
Photos : Pierre Causeret

Lune en dernier quartier, période de l'équinoxe d'automne

Les derniers quartiers de Lune proches de l'équinoxe d'automne sont toujours hauts par rapport à l'horizon en raison des positions respectives de la Lune et du Soleil sur l'écliptique.

Nous supposerons d'abord que le plan de l'orbite de la Lune autour de la Terre est le même que celui de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Vue de la Terre, la position de la Lune se trouve sur le cercle écliptique, course annuelle du Soleil sur la sphère céleste.

¹ Les conclusions dans lesquelles figurent la hauteur de la Lune ou du Soleil, s'appliquent pour des lieux de latitude nord supérieure à celle du Tropique du Cancer



Présentation de la maquette de visualisation

Les figures 2 à 4 sont des photos d'une maquette de démonstration, facile à réaliser, permettant de visualiser la géométrie du système Soleil-Terre-Lune, dans un référentiel terrestre. Le personnage est un observateur situé dans l'hémisphère nord à une latitude de 50° (environ celle de Paris, ou de Vancouver...).

Figure 2 : Maquette géocentrique

Les étoiles, représentées en noir, sont liées à la sphère céleste. Elles sont reliées par des traits bleus figurant les constellations. Les astres mobiles (Soleil, Lune, planètes...) sont positionnés manuellement suivant la configuration que l'on souhaite visualiser.



Figure 2a : Horizon de la maquette géocentrique.

L'axe polaire rouge qui va recevoir la « sphère céleste » est incliné de 50° par rapport à l'horizon pour visualiser les observations d'un observateur placé à la latitude 50° Nord.

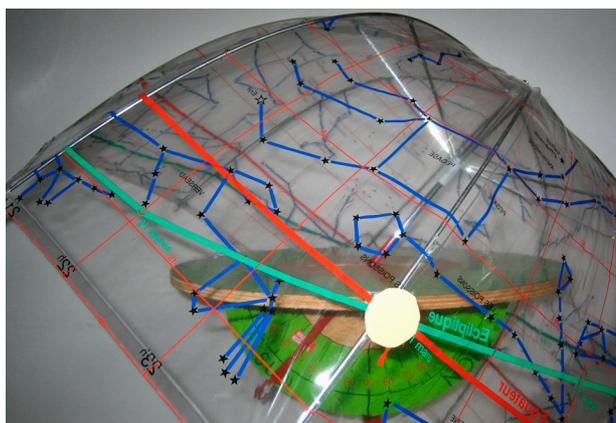


Figure 2b : Sphère céleste

La ligne rouge représente l'équateur céleste. Lors du mouvement diurne, son plan reste identique. La ligne verte représente le cercle écliptique. Lors du mouvement diurne, son plan change d'orientation.

Application à la période de l'équinoxe d'automne

Quelle est la situation le mercredi 3 octobre 2007 vue de la Terre ?

Figure 3 : Sphère céleste au dessus de l'horizon de Paris, mercredi 3 octobre 2007 à 5h37 T.U

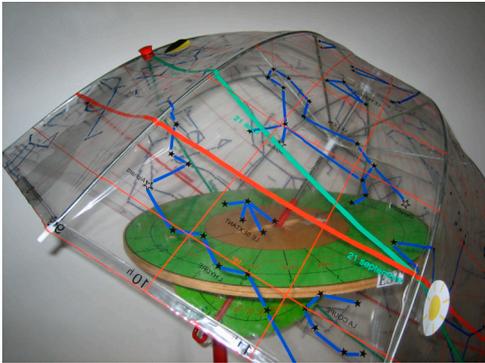


Figure 3a : Maquette en vue extérieure : Le Soleil placé sur l'écliptique le 3 octobre. Lors du dernier quartier, l'angle Lune-Observateur-Soleil est d'environ 90° et la Lune se rapproche du Soleil dans le sens opposé au mouvement diurne. Lorsque la Lune passe au méridien, le Soleil va se lever vers l'horizon Est.

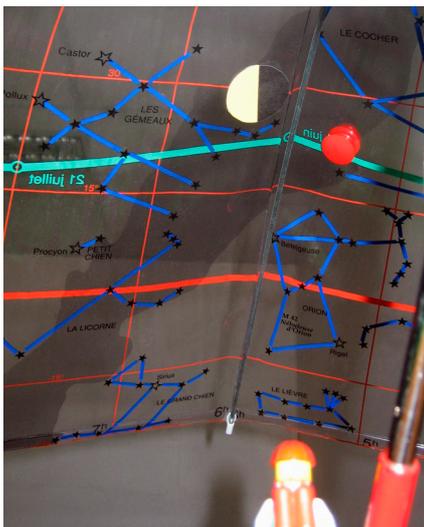


Figure 3b : Maquette en vue intérieure. L'observateur regarde vers le Sud.

- Le Soleil va se lever vers l'horizon Est, sur la gauche.
- Le quartier gauche de la Lune est donc illuminé.

Le point rouge représente la planète Mars
L'observateur voit la Lune particulièrement haute par rapport à l'horizon. Lors du passage au méridien, la hauteur de la Lune est élevée et vaut environ $(90^\circ - \text{Latitude du lieu} + 23^\circ) = 64^\circ$ (à Paris de latitude 49°N)

Application à la période de l'équinoxe de printemps

Le quartier de Lune est assez bas au dessus de l'horizon. Le Soleil se lève.

- L'observateur regarde vers le Sud.
- Le Soleil se lève vers l'horizon Est sur sa gauche.

Par un raisonnement analogue, et en se référant à la figure 1, on comprend que tous les derniers quartiers de Lune proches du 22 septembre sont hauts ainsi que tous les premiers quartiers proches du 21 mars et toutes les pleines lunes proches du 21 décembre : leur hauteur lors du passage au méridien est voisine de celle du Soleil le 21 juin.

Figure 4: Sphère céleste au dessus de l'horizon de Paris le samedi 29 mars 2008 à 5h38 T.U

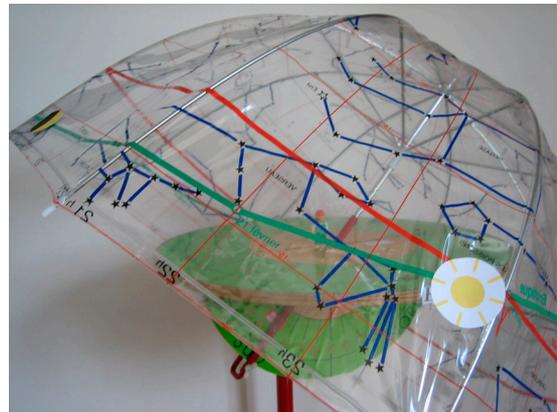


Figure 4a : Vue extérieure : L'écliptique est maintenant « sous » l'équateur céleste.

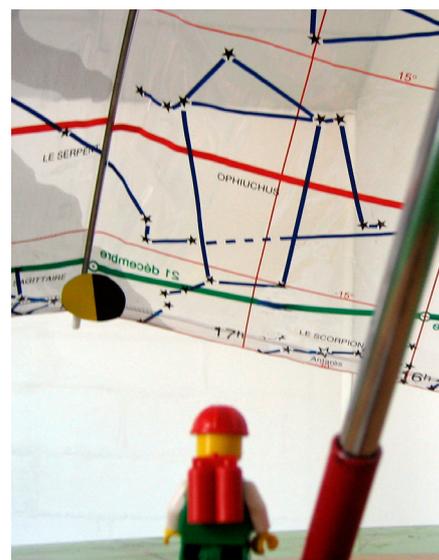


Figure 4b : Vue intérieure : l'écliptique est maintenant « sous » l'équateur céleste

De même tous les premiers quartiers de Lune proches du 22 septembre ainsi que tous les derniers quartiers proches du 21 mars et toutes les pleines lunes proches du 21 juin sont basses : leur hauteur lors du passage au méridien est voisine de celle du Soleil vers le 21 décembre $\approx (90^\circ - \text{Latitude} - 23^\circ) = 18^\circ$ à Paris. Ce sera par exemple le cas le 29 mars 2008 (tableau 2).

Résumons tout ceci dans un tableau, donnant les positions de la Lune au dessus de l'horizon, observée en France, selon la saison et la phase du cycle lunaire : les valeurs approximatives des hauteurs de la Lune haute ou basse sont $(90^\circ - \text{Latitude} + \text{ou} - 23^\circ) = 64^\circ$ ou 18° .

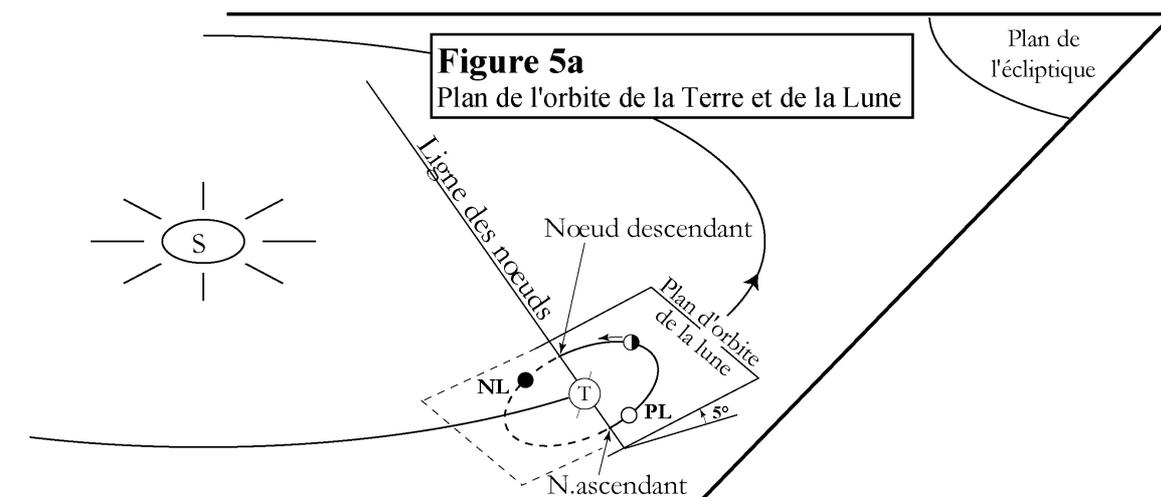
| Hémisphère Nord, Date proche de... | Premier quartier | Pleine lune | Dernier quartier | Nouvelle lune ² |
|---|------------------|-------------|------------------|----------------------------|
| équinoxe de printemps (20-21 mars) ³ | haute | | basse | |
| solstice d'été (20-21 juin) | | basse | | haute |
| solstice d'hiver (21-22 décembre) | basse | | haute | |
| équinoxe de printemps (20-21 mars) | | haute | | basse |

Effet de l'inclinaison de 5° entre les plans des orbites de la Terre et de la Lune, situations « extrêmes »

Levons l'approximation faite jusqu'à présent. Le 3 octobre 2007, la Lune n'était pas dans le plan de l'écliptique, mais était « au dessus » de l'écliptique, donc l'observateur terrestre la voyait encore plus haute dans le ciel. En effet, le plan d'orbite de la Lune autour de la Terre fait un angle de $5^\circ 12'$ avec le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. L'intersection des deux plans s'appelle la ligne des nœuds (Figure 5a) avec :

- le nœud ascendant lorsque la lune passe « au dessus » de l'écliptique ;
- le nœud descendant lorsque la lune passe « sous » l'écliptique.

Or, le plan de l'orbite de la Lune se trouve fin septembre 2007 dans la configuration de la figure 5b.



² Observation du fin croissant de lune avant ou après la nouvelle lune, celle-ci étant non visible...

³ Concernant ces dates, vous pouvez consulter le site de l'[Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides](#), rubrique « éphémérides », et en particulier un court article à propos [des dates de l'équinoxe d'automne](#).

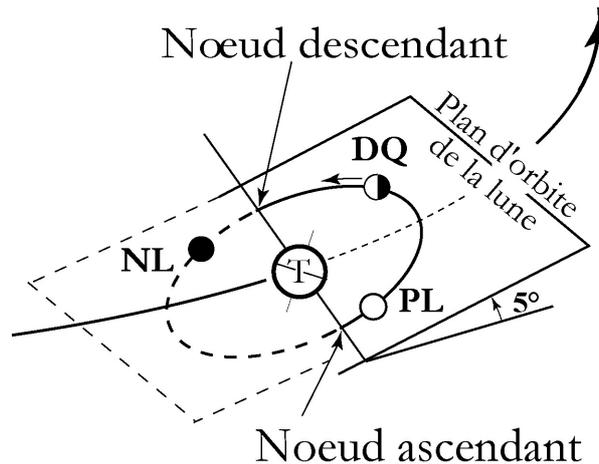


Figure 5b : Configuration le 3 octobre 2007

Données de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE)

Passage au méridien : 5h37m15s
Déclinaison : 27°43'

On peut trouver sa hauteur :
 $90^\circ - 48^\circ 50' + 27^\circ 43' = 68^\circ 53'$

Passage au nœud ascendant le 25 sept. 2007 à 0h45 T.U.

Pleine Lune le mercredi 26 sept. à 10h46 T.U.

Latitude écliptique maximale le 1^{er} octobre à 1h30 T.U.: 5°12'

Dernier quartier le mercredi 3 oct. à 10h07 T.U. (latitude de la Lune: 4°22')

Passage au nœud descendant le dimanche 7 oct. à 20h05 T.U.

Nouvelle lune le vendredi 12 oct. à 5h02 T.U.

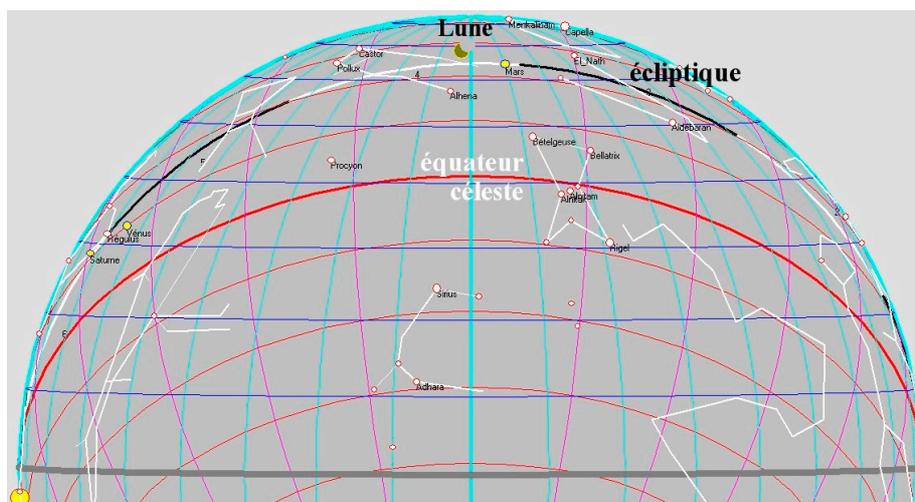
Observatoire de Paris : 2° 20 ' 0 " Est 48° 50 ' 0 " Nord

Vues du ciel à Paris

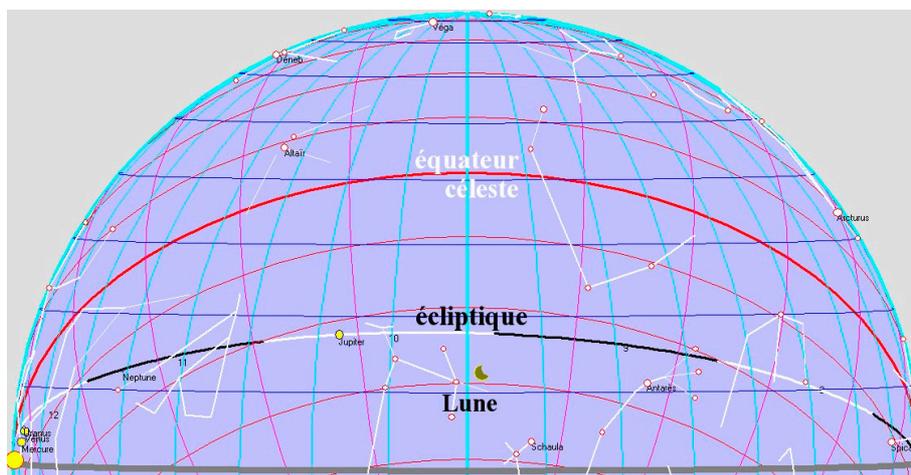
Pour finir, voici deux vues du ciel à Paris pour les deux situations « extrêmes » décrites ci-dessus (Lune particulièrement haute ou basse).

Ces images ont été obtenues à l'aide du logiciel Solarium téléchargeable gratuitement à l'adresse :

http://isheyevonens-lyon.fr/village_este/cycles/cycle-3/cadrans_solaires/solarium/



Vue du ciel à Paris mercredi 3 octobre 2007 à 5h37 T.U. vers le Sud (Lever du soleil à 5h57 T.U.)



*Vue du ciel à Paris samedi 29 mars 2008 à 5h38 T.U. vers le Sud
Lever du Soleil à 5h38, Passage de la Lune à 5h28 T.U.*

Remerciements pour leurs remarques : Marie-Christine Artru et Catherine Simand, ainsi que Pierre Causeret pour ses photographies.

À 37 h près, Pâques aurait pu être en avril !

Et oui, cette année le jour de la Pâques catholique est le 23 mars. C'est assez rare que cette fête tombe si tôt dans l'année. Et oui, à 37 h près elle aurait pu tomber le 20 avril.

En effet, la date de Pâques a été fixée lors du Concile de Nicée.

C'est le dimanche qui suit le quatorzième jour de la Lune (PL) qui atteint cet âge au 21 mars ou immédiatement après". En 2008, l'équinoxe a lieu le 20 mars à 5 h 48.

Il y aura Pleine Lune le 21 mars à 18 h 40 et c'est le dimanche suivant soit le 23 mars ce sera Pâques.

Si la Pleine Lune avait eu lieu le 20 mars à 5 h 47, il aurait fallu attendre la Pleine Lune suivante et Pâques aurait eu lieu le 20 avril.

Voici quelques dates tardives pour Pâques : le 25 avril 1943, 1666, 1546 et il faudra attendre 2038 pour que cela se renouvelle.

24 avril : il faudra attendre 2011, mais cela s'est produit en 1859, 1791, 1707 et 1639.

Le record du 23 mars a été égalé en 1913, 1856, 1845, 1788, 1704 et 1636, mais il faudra attendre 2160 (je vous le rappellerai). Et en 1818, 1761, 1598 et 1573 Pâques est tombé un 22 mars.

Remarque : en fait ce n'est pas un calcul astronomique qui permet de définir la date de Pâques, mais celle-ci est définie à l'aide d'un calendrier perpétuel lunaire utilisant une Lune moyenne fictive.

Jean Ripert

Boire et sonner

Quand on parle de Pâques, on pense aux cloches et on pense alors à la célèbre cloche de la cathédrale de Rouen, "La Rigaude". Cette cloche était si lourde qu'il fallait, soi-disant, avoir bu beaucoup pour parvenir à la faire sonner. C'est de là qu'est venue l'expression "Boire à tire la Rigaud".



Essai de détermination de distance d'une nébuleuse planétaire par photométrie

Jamon Jessica, Lamiable Alexandre, Laporte Nicolas, Toporenko Fany
Lycée de Chamalières - Professeur : Bouteville Gilles

Résumé : Les nébuleuses planétaires sont des enveloppes gazeuses, résidus d'évolution, de formes plus ou moins sphériques, qui entourent certaines étoiles chaudes en fin de vie. C'est le rayonnement de l'étoile centrale, riche en UV qui excite le gaz de l'enveloppe.
Par l'observation photométrique en deux couleurs (bleu et jaune), nous tentons de retrouver les propriétés de la nébuleuse de la Lyre et d'estimer sa distance.

Entre 1911 et 1913, l'astronome Danois *Ejnar Hertzsprung* (1873-1967) et l'Américain *Henry Russell* (1877-1957) firent, chacun de leur côté, une découverte de la première importance : Il s'agissait de la représentation graphique de la magnitude absolue en fonction du type spectral (ou de la température) pour quelques centaines d'étoiles dont l'éloignement avait été déterminé par parallaxe.

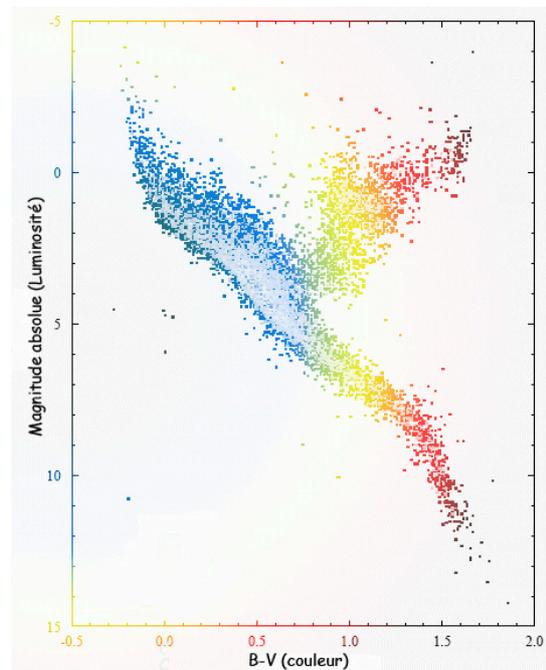
Par ce diagramme "HR", relativement simple, on réussit à pénétrer le secret de la vie des étoiles, à reconnaître celles qui sont tout juste nées, celles qui sont adultes ou encore celles qui sont sénescentes, à établir le degré d'évolution atteint par des rassemblements d'étoiles (encore appelés *amas stellaires*), à attribuer à certains de ceux-là un âge de plusieurs milliards d'années, et à d'autres un âge de seulement quelques millions d'années.

Le principe

La lumière émise par une étoile peut être décrite approximativement par le modèle de rayonnement du « corps noir ». Une étoile chaude rayonne plus d'énergie dans le domaine spectral bleu (courte longueur d'onde) que dans le jaune (grande longueur d'onde).

En considérant que ce diagramme exprime une loi statistique applicable à toutes les étoiles, nous pouvons nous en servir pour en déduire la distance d'étoiles trop lointaines pour qu'on puisse déterminer leur parallaxe trigonométrique.

Le diagramme HR peut nous indiquer sa magnitude absolue M à partir de la couleur de l'étoile. Si nous



crédit: ESA-HIPPARCOS

mesurons la magnitude apparente m , nous pouvons déterminer sa distance réelle.

« *Donnez-moi la magnitude absolue d'un astre et je vous dirai à quelle distance il se trouve* », pourrait-on dire en paraphrasant Archimède.

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

avec :

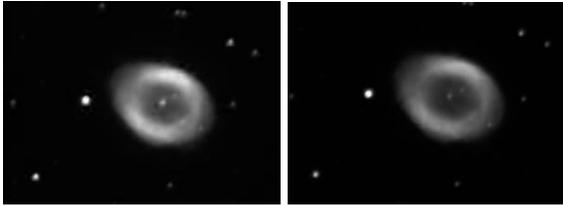
m la magnitude apparente (ou visuelle) de l'étoile,

M la magnitude absolue de l'étoile,

d la distance de l'étoile en parsec (1 pc=3,26 a.l.).

Les mesures

Des photographies furent prises à travers deux filtres (B, V) au télescope de 120 cm de l'Observatoire de Haute-Provence, du 22 au 26 avril 2002.



Photographies en B et V prises à l'OHP.



Image trichrome de la nébuleuse planétaire. L'image en couleur est reconstruite à partir de plusieurs filtres (BVR). L'enveloppe gazeuse montre l'abondance de quelques éléments présents : hydrogène (rouge), azote (vert) et oxygène (bleu).

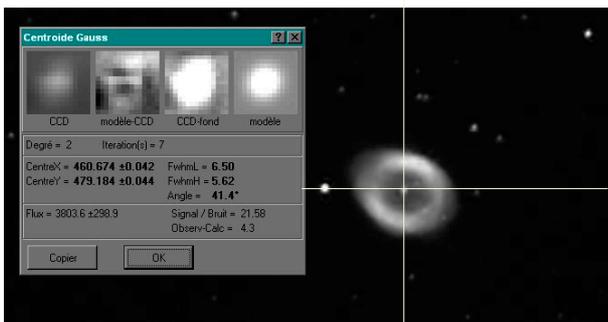
Magnitudes et indice de couleur

Sur la photographie on cherche une étoile de référence pour laquelle on connaît la magnitude bleue B_{ref} et visible V_{ref} (catalogues).

Sur chaque cliché, on mesure avec le logiciel Prism 5.0, les flux lumineux, f_{ref} , et f (en unité arbitraire), de l'étoile de référence et de l'étoile centrale de la nébuleuse, respectivement.

La relation de Pogson permet alors d'estimer les magnitudes de l'objet étudié :

$$m - m_{ref} = 2,5 \log \left(\frac{f_{ref}}{f} \right)$$



pour chaque filtre. On en déduit alors les magnitudes apparentes B et V et l'indice de couleur : $B - V$.

Résultats

Le tableau ci-dessous résume les calculs. On trouve que les magnitudes apparentes de M57 sont $B=11,9 \pm 0,1$ et $V=12,5 \pm 0,1$. L'indice de couleur est donc environ $B-V = -0,6 \pm 0,2$. Cette "couleur" est extrêmement négative, donc très bleue, même si elle est très incertaine. La température est donc extrêmement élevée.

En utilisant un diagramme HR, l'indice B-V en abscisse permettrait d'évaluer en ordonnée la magnitude absolue M de l'étoile. La pointe extrême la plus bleue de la région des nébuleuses planétaires dans le diagramme HR correspond à $M \approx 1$. Cette valeur conduirait à une distance $d=2000$ pc, trois fois la distance estimée par la méthode des parallaxes géométriques (Hipparcos).

Rappel sur l'évolution d'une étoile

Après avoir quitté la séquence principale et être remontée vers les géantes rouges, l'étoile se déplace vers la gauche et perd son atmosphère. Son noyau se contracte en s'échauffant. Lorsque la température de surface atteint ou dépasse les 25 000 K, les radiations, riches en UV, illuminent l'atmosphère précédemment expulsée et on observe alors une nébuleuse planétaire (en haut à gauche du diagramme).

Plus tard, le noyau se refroidira et se contractera, jusqu'à devenir une naine blanche, puis brune.

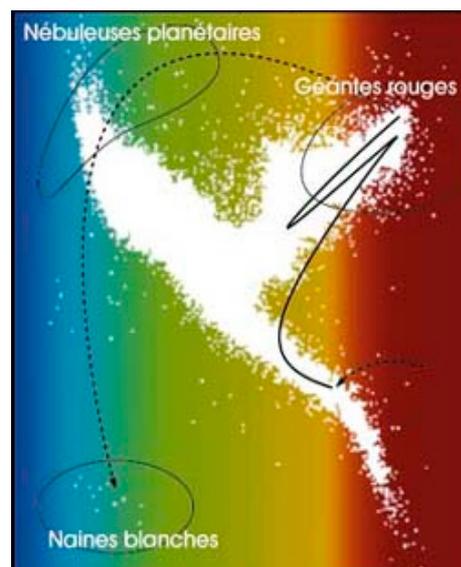


Diagramme HR, magnitude absolue en fonction du type spectral (ou de la température effective).

| | Flux (unité arbitraire) | | magnitude apparente | | indice de couleur B-V |
|-------------------------------|-------------------------|-------------|---------------------|------------|-----------------------|
| | B | V | B | V | |
| Étoile de référence (Hip1097) | 179150±3323 | 391009±5278 | 11,67±0,06 | 11,03±0,06 | |
| Nébuleuse de la Lyre (M57) | 130288±3662 | 87208±3560 | 11,9±0,11 | 12,54±0,12 | -0,65±0.17 |

Note de la rédaction

La mesure des distances des nébuleuses planétaires est extrêmement difficile et, sauf dans de rares cas où la nébuleuse est accessible à des mesures de parallaxes géométriques, on a recours à des méthodes indirectes (nébuleuse dans un amas ou associée à une étoile compagnon).

Le résultat de cet article montre que l'étoile centrale d'une nébuleuse planétaire est une étoile relativement peu lumineuse en dépit de sa température très élevée (indice de couleur très négatif).

Bien que l'application aux nébuleuses planétaires comporte une très large incertitude, le diagramme HR reste malgré tout, un instrument précieux pour l'évaluation des distances des étoiles classiques.

Les étoiles naines de la séquence principale étant les plus nombreuses on peut calculer les distances stellaires par la méthode exposée, en supposant que toutes les étoiles sont des étoiles naines.

Questions d'enfants

Pourquoi les étoiles et la Lune brillent-elles ?

G. Paturel, sur une idée de Jean Ripert et Francine Billard

Prenons l'exemple du Soleil en train de se former à partir de la matière interstellaire. Il faut savoir que tous les éléments de matière s'attirent les uns les autres. C'est ce qu'on appelle la *gravitation*. Quand la matière s'est suffisamment agglomérée sous l'effet de la gravitation, la pression s'est mise à augmenter beaucoup.

La température a augmenté, comme dans une pompe à vélo dans laquelle on comprime de l'air. Les atomes se sont rapprochés



les uns des autres et se sont entrechoqués avec des vitesses de collisions énormes, à un point tel, qu'ils ont pu *fusionner*. Or, cette fusion libère beaucoup d'énergie. C'est la même énergie que celle des bombes thermonucléaires (bombes H). Cette énergie énorme est responsable de la lumière des étoiles.

Se passe-t-il la même chose au cœur de la Lune ou de la Terre? Non. La Lune, comme la Terre, n'a pas dans son cœur de réactions de fusion, comme celles qui se produisent au cœur du Soleil. Pourtant la Lune brille aussi. Comment est-ce possible ?

En fait c'est très simple. La Lune est éclairée par le Soleil et sa surface nous renvoie une partie de la lumière. Une boule d'un sapin de Noël ne produit pas de lumière et



pourtant on la voit briller, car elle renvoie la lumière des lampes placées tout autour. Il en va de même pour la Lune et les Planètes. Il n'y a qu'une seule grosse lampe dans le système solaire : le Soleil.

RÉALISATION

Le parallaxomètre de "Bardin"

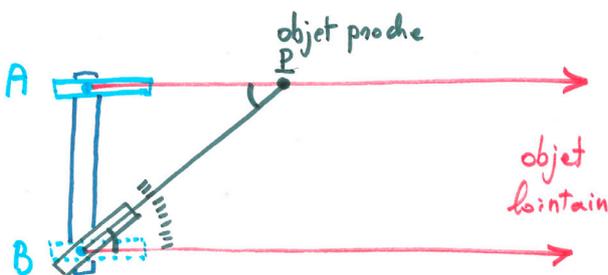
D.Bardin et les stagiaires de l'EEA 2007

Résumé : Lors de la dernière école d'été du CLEA, nous avons réalisé un appareil très simple pour appliquer la méthode des parallaxes à la mesure de distances. Compte tenu de sa simplicité, l'appareil est décrit brièvement. La procédure de mesure est donnée et une application pratique est réalisée. Nous donnons quelques conseils pour une amélioration ultérieure.

Le principe

Tout le monde connaît la méthode de la parallaxe qui permet de mesurer la distance d'un objet lointain sans l'approcher. On vise l'objet P depuis deux points A et B (cf. Figure ci-dessous). On mesure l'angle α par rapport à une direction de référence donnée par un astre lointain, que nous supposons à l'infini. Si on connaît la longueur AB, la distance AP se déduit très simplement par la relation :

$$AP = \frac{AB}{\tan(\alpha)}$$



Dans toute cette explication, on a supposé implicitement plusieurs choses:

- le segment AB est fixe et perpendiculaire aux lignes de visée,
- on possède une direction de référence fixe dans l'espace.

On peut se convaincre facilement de l'effet de la parallaxe en regardant son crayon tenu à bout de bras, avec l'œil droit ou avec l'œil gauche. On voit le crayon se déplacer sur le fond lointain. C'est l'effet de parallaxe. Le même effet affecte la visée avec un appareil photo, car l'axe optique du viseur n'est pas confondu avec l'axe optique de l'objectif. Il y a un décalage entre l'image vue et l'image photographiée. Les appareils photo numériques

permettent une visée reflex en montrant sur un petit écran LCD l'image vue à travers l'objectif.

Réalisation pratique

Un appareil simplifié a été réalisé à l'école d'été d'astronomie 2007 par Daniel Bardin¹. La réalisation est une application stricte du principe. Une base AB faite d'une barre de bois, supporte deux viseurs constitués de tubes en plastique.



Vue générale du parallaxomètre.

Les tubes sont montés sur des platines, en contreplaqué, qui peuvent, chacune, tourner autour d'un axe vertical fait de simples boulons et écrous à oreilles. Chaque tube est tenu sur sa platine par un élastique qui le plaque doucement sur des cornières d'aluminium munies d'un "V" de positionnement. La position du tube est ainsi solidaire de sa platine sans jeu (attention de ne pas trop serrer l'élastique, pour ne pas tordre le tube).

Du côté A, la platine ne comporte pas de graduations, mais elle peut tourner néanmoins d'une dizaine de degrés autour de sa position normale

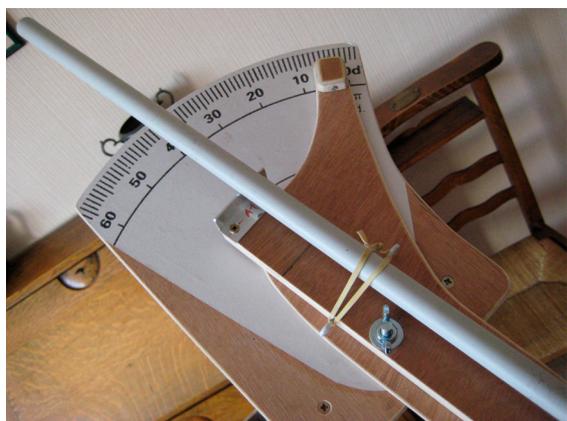
¹ Il a été convenu par les stagiaires d'appeler l'appareil le "parallaxomètre de Bardin"

(tube perpendiculaire à AB). Ceci permettra le réglage de la direction de référence.



Viseur de gauche, mobile pour "faire le zéro".

Du côté B, il y a une plaque fixe qui possède des graduations en arc de cercle centrées sur l'axe de rotation de la platine mobile. Celle-ci peut tourner d'environ cinquante degrés vers l'intérieur du dispositif et de quelques degrés vers l'extérieur (pour les réglages). Les graduations ont été réalisées par photocopie et agrandissement. La platine mobile possède une pointe qui permet de repérer la graduation.



Viseur de droite tournant devant une graduation angulaire.

Dernier détail de construction, la barre AB est taraudée en son centre à l'aide d'une vis au pas "photo", afin que le dispositif puisse être fixé sur un pied photographique. Une alternative est d'utiliser un serre-joint pour cette fixation.



Fixation de la barre sur un pied photo par taraudage dans le bois.

Application pratique

Nous devons d'abord régler le parallélisme des viseurs du parallaxomètre. La procédure est la suivante. On place la barre du parallaxomètre perpendiculairement à la ligne de visée choisie, en direction d'un repère lointain (par exemple : sommet de montagne, voire même une étoile).



L'appareil monté sur le pied photo.

On place le viseur de droite sur la graduation zéro et on vise le repère lointain. Ensuite, sans bouger le parallaxomètre, on vise le même repère avec le viseur de gauche en le faisant tourner légèrement (nous rappelons que ce viseur a une petite latitude de réglage). On s'assure, sans bouger l'appareil, que le repère lointain est bien centré dans les deux viseurs. On bloque la position du viseur de gauche. Nous n'aurons plus à le modifier. L'appareil est ainsi réglé et prêt à être utilisé.

Nous avons placé un objet P à une distance proche (un tube jaune de colle posé sur une barrière - voir la photo). Nous avons visé cet objet proche avec le viseur de gauche en déplaçant l'ensemble de l'appareil. Puis, nous avons visé ce même objet avec le viseur de droite en le faisant tourner devant les graduations. L'angle dont il a fallu tourner ce viseur de droite était :

$$\alpha = 11,6 \text{ degrés.}$$

La séparation entre les axes des deux tubes de visée, en leur point de rotation, est mesurée. C'est la largeur de la base AB. Nous avons trouvé :

$$AB = 1,035 \text{ m}$$

Une petite correction pour tenir compte de la non perpendicularité de la base vis-à-vis de la ligne de visée (écart de 3 degrés), réduit la base effective à $1,035 \cdot \cos 3 = 1,034$.

La distance est calculée comme :

$$AP = \frac{1,034}{\tan(11,6)} = 5,0 \text{ m}$$

La valeur réelle mesurée après coup à l'aide d'un mètre à ruban donne la valeur réelle $AP = 5,29 \text{ m}$.

Comparaison avec une méthode photo

Nous avons utilisé ensuite une autre procédure pour faire la même mesure. Nous avons fait deux photos en déplaçant l'appareil latéralement d'une longueur $AB = 0,697 \text{ m}$. Les photos sont données ci-après.

Pour la première photo nous avons placé un ruban gradué, à un mètre de distance de l'appareil. Ce ruban permet de faire l'étalonnage du champ, pour obtenir l'échelle de la photo.

On peut soit calculer l'échelle des tirages photos, à l'aide de l'image du ruban : 15 cm vrais du ruban donnent 6,1 cm sur le tirage papier de la photo. Ces 15 cm, visés depuis 1m, apparaissent donc sous un angle de $8,53^\circ$. L'échelle des tirages papier est donc de $8,53/6,1 = 1,398 \text{ }^\circ/\text{cm}$.



Photo de l'objet dont on cherche la distance (tube de colle posé sur la barrière). Le ruban de calibration est fixé à un mètre de l'appareil photo..



Photo prise après un déplacement sur la droite.

Le décalage de l'objet visé entre les deux photos est de 5,3 cm sur les tirages papier, soit un angle de parallaxe de $1,398 \times 5,3 = 7,41^\circ$. La distance de l'objet est donc $0,697/\tan(7,41) = 5,36 \text{ m}$, au lieu des 5,29 m réels.

Une autre méthode, préconisée par Francis, a consisté à mesurer le décalage apparent de l'objet avec un papier calque et à reporter les deux traits repères sur l'image du ruban de calibration. Les deux traits correspondent à une séparation de 0,13m vrais, vus à un mètre. Un simple produit en croix a donné la distance cherchée : $0,697/0,133 = 5,24 \pm 0,04 \text{ m}$, au lieu des 5,29 m vrais.

Comment améliorer l'appareil

Il est possible d'améliorer l'appareil pour obtenir des mesures bien plus précises.

Tout d'abord, comme pour tout instrument de visée, il y a le plus grand intérêt à avoir un pied très stable (ce qui n'était pas le cas de notre pied photo).

L'amélioration la plus simple consiste à perfectionner la mesure angulaire. On peut imaginer de fabriquer un petit vernier comme dans le théodolite (voir CC117, p35). Une solution alternative, serait de faire tourner le viseur de droite avec une vis. Connaissant le pas de la vis, il est possible, en comptant le nombre de tours de vis, de trouver le déplacement à une distance donnée de l'axe de rotation, et partant, d'avoir l'angle de rotation, avec une grande précision.

Enfin, la modification, qui conduirait à la plus grande amélioration, consisterait à remplacer les tubes de visée par des lunettes astronomiques, même très simples. Le but n'étant pas d'avoir de bonnes images mais de pouvoir reconnaître l'objet visé. Il serait même judicieux de doter l'oculaire d'un réticule de pointage.

■

Convergence : l'équation d'un miroir parfait

G. Paturel, Observatoire de Lyon

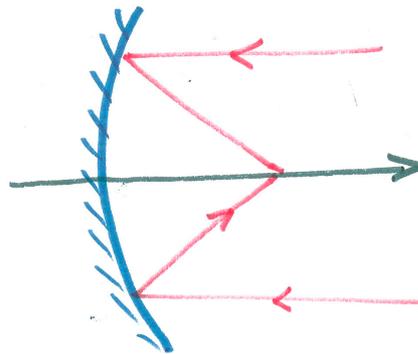
Résumé : Nous allons expliquer et montrer par un calcul très simple que l'équation d'un miroir parfait de télescope est un paraboloïde de révolution. L'idée sous-jacente est la recherche d'un moyen de fabriquer un tel miroir à très bas prix.

Analyse du problème

Une lumière monochromatique qui arrive d'une étoile peut être considérée, avec un très haut degré de précision, comme une onde plane d'amplitude constante et de longueur d'onde unique. En effet, quand l'observateur est très proche d'une source lumineuse ponctuelle, l'amplitude de l'onde émanant de cette source varie comme l'inverse de la distance. C'est la condition nécessaire pour que la loi de conservation de l'énergie soit satisfaite. La courbure des surfaces d'égale phase est notable. Mais, quand la source ponctuelle est très lointaine et que nous l'analysons avec une ouverture de petit diamètre comparée à la distance de la source, alors l'amplitude peut être regardée comme constante et les surfaces d'égale phase comme des plans.

Comment faire pour former une image de cette source ponctuelle lointaine ? La réponse est connue de tous : il suffit de faire converger les rayons lumineux en un seul point, de telle manière que tous les rayons en phase dans l'onde plane, arrivent au même instant au point de convergence.

Le problème étant posé, il faut le résoudre. En fait, il y a plusieurs façons de faire converger les rayons d'une telle onde. On peut utiliser un miroir concave, une lentille classique, une lentille de Fresnel, une lentille interférentielle (connue sous le nom de réseau zoné de Soret) ou même une lentille gravitationnelle. Nous commencerons par le cas le plus simple : le miroir concave. Le dernier cas, même s'il est effectivement utilisé en astronomie, est un cas très particulier dont nous aurons sans doute l'occasion de reparler. Pour l'instant nous allons nous occuper de la première méthode : l'utilisation d'un miroir concave.



Se pose alors le problème de savoir quelle forme précise donner au miroir. C'est ce que nous allons calculer maintenant.

Calcul de l'équation du miroir

Remarquons tout d'abord que par raison de symétrie, la surface du miroir doit être une surface de révolution autour de la ligne de visée, qui sera, de fait, l'axe optique de notre système. Il suffira de trouver l'équation de la courbe d'intersection du miroir et d'un plan quelconque passant par l'axe optique. C'est cette courbe dont nous allons calculer l'équation.

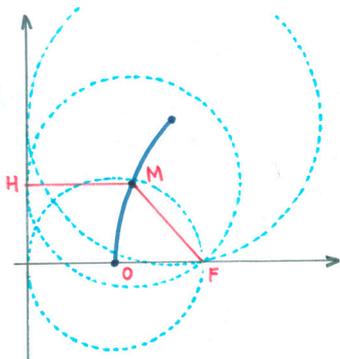
La deuxième remarque est que le chemin optique d'un rayon réfléchi sur un miroir¹ ne dépend pas de la longueur d'onde. Le résultat sera donc valable, même pour une source non monochromatique. Ceci ne sera pas vrai pour une lentille simple, car le chemin optique dépend de l'indice de réfraction du verre, qui lui-même dépend de la longueur d'onde.

¹ Il faut naturellement que la couche métallique réfléchissante soit directement exposée aux rayons lumineux et non derrière le support de verre, comme c'est le cas pour un miroir de salle de bain.

Considérons la figure sur la colonne de droite. Une onde plane progresse de la droite vers la gauche. Nous avons dessiné les plans d'égalité de phase successifs (bleu clair). En l'absence de miroir sur le trajet chaque point du plan (P_0) irait sur le plan (P) en suivant une ligne parallèle à l'axe optique. Si l'onde P_0 touche le miroir en M , la réflexion se fait sur ce point M du miroir et le rayon réfléchi arrive au foyer en F . En l'absence de miroir le rayon serait arrivé en H avec la même phase que dans le plan P_0 . Si nous voulons que la phase du point M ne soit pas altérée en F , il suffit que le trajet $MH=MF$. Pour un autre point M' de l'onde arrivant sur le miroir un peu avant (ou après), la même condition doit être satisfaite. En conclusion, tous les rayons du plan P_0 arriveront en F avec la phase qu'ils auraient eue dans le plan P quand la condition $MH=MF$ est satisfaite.

Représentation géométrique

On peut tracer les cercles tangents au plan P et passant par le point F . Le lieu géométrique du centre de ces cercles satisfait la condition cherchée. Si vous vous rappelez votre cours de géométrie, le lieu des centres des cercles tangents à une droite donnée et passant par un point donné est une parabole.



La parabole est le lieu des centres des cercles passant par un point donné et tangents à une droite donnée.

L'équation cherchée est une parabole et le miroir sera un parabolôïde de révolution.

Équation mathématique

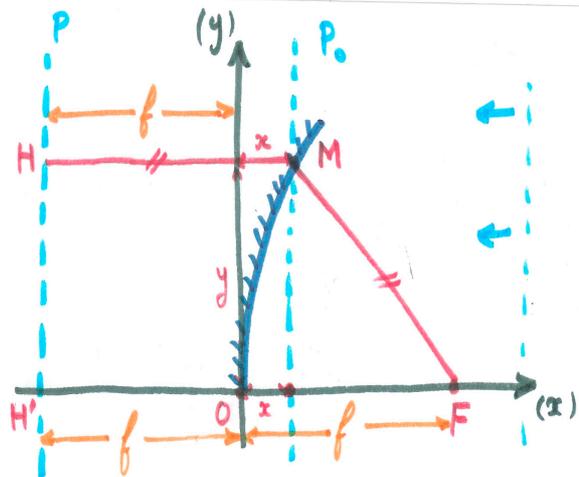
On peut noter que, sur l'axe optique, le miroir doit être en un point O , milieu du segment $[FH]$. Nous allons considérer le repère yOx . L'axe des x étant le long de l'axe optique, compté positivement de la gauche vers la droite, l'axe y passera par O et sera perpendiculaire à l'axe optique (la direction a peu d'importance à cause de la symétrie de révolution).

En posant $OF=f$ (évidemment, la valeur f sera appelée la distance focale), on a :

$$MH = f + x$$

et

$$MF = \sqrt{y^2 + (f - x)^2} .$$



La condition $MH=MF$, équivalente à la condition $MH^2=MF^2$, s'écrit donc :

$$(f + x)^2 = y^2 + (f - x)^2 ,$$

qui, une fois développée et simplifiée, conduit à :

$$y^2 = 4fx \quad \text{ou} \quad x = \frac{y^2}{4f} \quad (1)$$

égalités dans lesquelles on reconnaît l'équation de la parabole représentant la fonction $y \mapsto \frac{1}{4f} y^2$

Autrement dit, x mesure l'écart à la planéité, à une distance y de l'axe optique. Nous appellerons cette quantité x la "déformation".

Application numérique

Passons à une application numérique. Tout d'abord nous pouvons noter que la dérivée dx/dy est une fonction linéaire de y . Au centre, la courbure du miroir est telle que le miroir est tangent, en O , au plan perpendiculaire à l'axe optique.

Considérons maintenant un disque de rayon $R=y_{\max}=6$ cm.

Quelle devrait être la déformation x_{\max} , au bord du disque, pour que la distance focale soit de 72 cm ?

L'application de la relation (1) donne immédiatement la réponse:

$$x_{\max} = 1/8 \text{ cm, soit } 1,25 \text{ mm.}$$

Le bord du disque doit être soulevé de 1,25mm. De même nous pouvons calculer la déformation au demi-rayon ($y=3\text{cm}$). Nous obtenons : $x=0,31 \text{ mm}$. La courbure est très faible. Plus la focale est grande, plus la déformation est faible à un rayon donné. Un miroir de 12 cm de diamètre et de 100 cm de focale aurait une déformation maximale de 0,9 mm à la périphérie.

Pourquoi ces calculs ?

Tout d'abord il y a la curiosité. Mais la véritable raison est que nous voudrions savoir s'il est possible de déformer un CD-ROM pour en faire un véritable miroir parabolique. J'avais fait quelques essais infructueux, mais j'avais pu constater, néanmoins, que je parvenais à focaliser l'image du Soleil. J'avais appliquée une déformation du CD, simplement en le plaçant sur un tore souple et en appuyant sur le centre du disque. Dans ce cas, la déformation était plus importante au centre qu'au bord, alors que l'équation montre qu'il faut que la déformation aille croissant du centre vers le bord. La conclusion est qu'il faut procéder autrement. L'idée serait de coller le disque du CD sur un disque rigide portant des couronnes concentriques d'épaisseurs *ad hoc*.

Ce projet, un peu fou, présente de toutes façons un autre problème. Un CD se comporte comme un réseau de diffraction aux rayures circulaires. On peut s'attendre à ce que seule l'image centrale soit une image blanche, comme dans un réseau classique de diffraction. Les images sur les bords devraient présenter des irisations.

Pour un miroir parabolique en verre recouvert d'une couche d'aluminium déposée par vaporisation sous vide, ce problème ne se pose pas, puisque l'angle de réflexion ne dépend pas de la longueur d'onde. Le système est parfaitement achromatique.

Nous allons tenter néanmoins cet essai et nous vous tiendrons au courant, quel qu'en soit le résultat. Nous verrons dans de prochains articles les convergences obtenues par lentille de verre et par interférences. A suivre donc...

■

Délire de jeunes astronomes

Quand j'étais jeune, en compagnie de quelques collègues, nous avons fantasmé sur un projet encore plus fou : celui d'utiliser un miroir de mercure tournant. Vous savez que la surface d'un liquide tournant prend la forme exacte d'un paraboloïde, d'où l'idée.

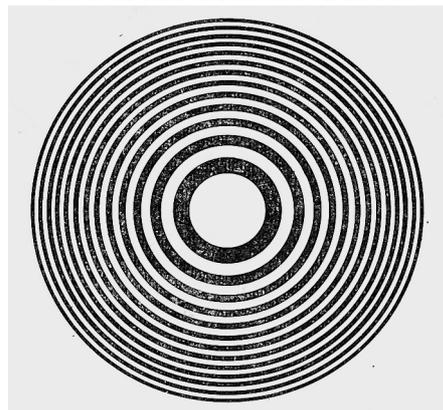
Nous n'imaginions pas que ce serait utilisé un jour. Pourtant, des télescopes à miroir de mercure ont été construits au Canada par Paul Hickson et Ermanno Borra. Le plus gros miroir a un diamètre de 6 mètres. La technique semble très prometteuse pour de futurs très grands télescopes.

Nous avons même poussé le délire jusqu'à imaginer produire des vibrations dans le liquide avec un quartz piézo-électrique pour créer un réseau concave. Mais cela n'existe pas... encore.



Credit Guy Plante, Univ. Laval

Le réseau zoné de Soret.



Crédit G. Bruhat - Optique

Un tel réseau se comporte comme une lentille convergente ayant plusieurs distances focales. Nous aurons sans doute l'occasion d'en reparler dans la série "convergence".

AVEC NOS ÉLÈVES

Mes représentations au début du projet Astronomie

Aurore Hornero et Nadège Guillaud-Magnin,
Ecole Primaire de Saint-Fallavier

Voici un petit questionnaire d'évaluation préparé pour une classe d'école primaire. Sauriez-vous répondre à toutes les questions ? Attention, il y a quelques questions piègeuses.

1- le Soleil change de place dans le ciel, au cours de la journée :

- Parce que le Soleil tourne autour de la Terre Parce que la Terre tourne sur elle-même
 Parce que la Terre tourne autour du soleil Je ne sais pas

2- Coche la bonne réponse :

- Le Soleil se lève vers le Nord Le Soleil se lève vers le Sud Le Soleil se lève vers l'Est
 Le Soleil se lève vers l'Ouest Je ne sais pas

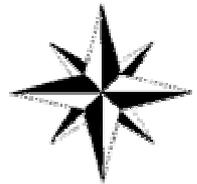


3 - Un matin, j'observe le lever du soleil. Une semaine plus tard, il se lèvera :

- Exactement au même endroit Pas exactement au même endroit Je ne sais pas

4-Suppose que de ta fenêtre, tu vois le Soleil se lever à ta gauche, et se coucher à ta droite :
Es-tu face

- Au Nord Au Sud À l'Est À l'Ouest



5- Dans nos régions, au cours d'une journée, le Soleil peut-il être exactement au dessus de toi ?

- En été En Hiver Jamais Je ne sais pas

6- A ton avis, pourquoi la nuit « tombe-t-elle » en fin de journée ?



7- Dans nos régions, les nuits :

- Ont toujours la même durée Ont des durées qui varient au cours de
 Sont toujours égales à la durée du jour Je ne sais pas

l'année

8- Dans nos régions, les jours :

- Ont toujours la même durée S'allongent en automne S'allongent au printemps
 Je ne sais pas



9- Cite toutes les saisons en donnant des dates, si possible :

| Saison (s) | Date (s) |
|------------|----------|
| | |
| | |
| | |
| | |

10- Quand c'est l'été dans nos régions...

- C'est l'été dans toutes les régions du monde C'est l'été en Afrique du Sud
 C'est l'été en Amérique du Nord Je ne sais pas



11- Est-il possible de voir la lune quand il fait jour ?

- Oui Non Je ne sais pas

12- Lorsque le ciel est dégagé, la lune :

- Est obligatoirement visible à 10 heures du soir Est obligatoirement visible à 5 heures du matin
 N'est pas obligatoirement visible Je ne sais pas

13- Barre les formes que la lune ne peut pas prendre.



14- Pourquoi la lune brille-t-elle ?



15- C'est la nuit, tu regardes les étoiles. Restent-elles toujours à la même place dans le ciel ?

- Oui Non Je ne sais pas

16- Dis-moi ce qu'est :

- Une étoile :
 Une planète :
 Un satellite :
 Une galaxie :



17- Complète avec : une étoile, une planète, un satellite, une galaxie

| | |
|-----------|--|
| Le soleil | |
| La Terre | |
| La Lune | |

Réponses : 1 : 2 - 2 : 3 - 3 : 2 - 4 : 2 - 5 : 3 - 6 : le Soleil passe sous l'horizon - 7 : 2 - 8 : 3 - 9 : printemps (mars) ; été (juin) ; automne (septembre) ; hiver (décembre) - 10 : 1 (d'un point de vue strictement astronomique) - 11 : 1 - 12 : 3 - 13 : barrer 3, 7 et 8 - 14 : La Lune renvoie la lumière du Soleil - 15 : 2 - 16 : étoile= objet qui produit de la lumière ; planète=objet qui tourne autour d'une étoile ; satellite=objet qui tourne autour d'une planète ; galaxie=immense groupement d'étoiles - 17 : Soleil=étoile ; Terre=planète ; Lune=satellite.

À propos de la question 13 : Quand la Lune est gibbeuse (formes 5 et 6) ou en croissant (formes 2 et 4), son contour, projeté sur un plan perpendiculaire à la ligne de visée, est fait d'un arc de cercle et d'un arc d'ellipse, les arcs étant tangents. Merci à Michel Bobin de nous avoir signalé cette particularité, que nous avons respectée, même si elle est difficile à déceler. NdLR

REMUE-MÉNINGES

Qu'est-ce là ?

Ce grillage, qui semble être du grillage à poules, a un rapport direct avec l'astronomie. Lequel ?

Je vous donne un premier indice : sachez que pour tailler un miroir de télescope en verre, il faut que la surface soit polie avec une précision au moins égale au dixième de la longueur d'onde à observer.

Pour vous aider encore, je vous donne un indice : regardez la couverture de ce numéro et vous aurez une piste sérieuse.

GP



La solution de ce remue-ménings est donnée avec des commentaires en page 40

Question subsidiaire

Quel devrait être selon vous l'image de couverture en 2009 ? *Tentative de réponse page 40*

Mots croisés

Horizontalement :

I: Débutants selon Clairaut. **II:** Renferme M42 - Or. **III:** Cycle de Méton - Partie principale d'un temple. **IV :** Romains - Refus étranger. **V:** Encouragement - Épice indienne composée. **VI:** Glissement vers le rouge (ou le bleu). **VII:** Forment un V couché dans le Taureau. **VIII:** Vallée africaine célèbre - Vigoureux. **IX:** Plateau volcanique - Posture de Yoga. **X:** Préposition - C'est ce qu'il y a de mieux avec plus ultra.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| I | | | | | | | | | | |
| II | | | | | | | | | | |
| III | | | | | | | | | | |
| IV | | | | | | | | | | |
| V | | | | | | | | | | |
| VI | | | | | | | | | | |
| VII | | | | | | | | | | |
| VIII | | | | | | | | | | |
| IX | | | | | | | | | | |
| X | | | | | | | | | | |

Verticalement :

1: Baïkonour, par exemple. **2:** Consulté à Delphes - Personnel. **3:** Ex station spatiale - Détectés par radar. **4:** Lune Outre-manche - Célèbre cru - Temps. **5:** Cardinaux - Garçon d'écurie. **6:** Son style porte ombrage (mais sans préjudice !). **7:** Couverture nuisible à l'observation. **8:** Reflux. **9:** Cap espagnol. **10:** Pas d'Italie - Augmentent brusquement d'éclat.

Jipé

La solution de ces mots croisés est donnée en page 40

Liste de diffusion, ou, "Comment pouvoir poser des questions et recevoir des réponses", avoir accès à des images du CLEA etc., via le Web

Les adhérents qui souhaitent être inscrits peuvent envoyer un message à : jripert@ac-toulouse.fr

C'est gratuit !

LECTURE POUR LA MARQUISE

Rien ne va plus en physique !

Lee Smolin

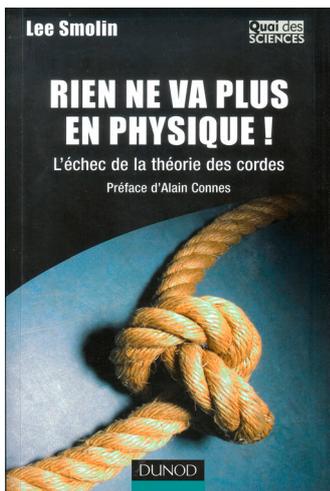
Préface d'Alain Connes

Dunod - Quai des Sciences

ISBN 978-2-10-050702-3

Que penser du livre de Lee Smolin ? On sait que ce livre a fait l'objet d'un débat entre Thibault Damour, un défenseur de la théorie des cordes, et Lee Smolin, un physicien ayant travaillé sur cette théorie mais l'ayant abandonnée.

L'auteur fait d'abord le point sur la physique théorique, en présentant les cinq grands problèmes. L'auteur montre les espoirs placés dans le "Large Hadron Collider", cet accélérateur puissant du CERN, qui pourra sans doute trouver deux briques manquantes : 1) le boson de Higgs, cette particule vecteur d'un champ prévu par le modèle standard 2) la preuve de la supersymétrie.



Même si Smolin ne croit plus en la théorie des cordes qui, selon lui, n'a pas tenu ses promesses et restera invérifiable, ce livre nous apprend beaucoup sur la physique actuelle.

L'auteur parle aussi des théories alternatives et de la confrontation difficile

entre les communautés qui ont pris parti pour ou contre la théorie des cordes. En lisant ce livre on peut penser que les querelles de l'époque galiléenne n'ont pas vraiment disparu, même si elles sont moins extrêmes. En particulier, l'auteur dit que les postes importants sont occupés par des tenants de la théorie des cordes et qu'il n'y a plus d'espoir pour un jeune chercheur de faire un travail dans une voie autre. Qu'en est-il ?

J'ai eu la chance de pouvoir poser la question à Costas Bachas, directeur de recherche au CNRS et spécialiste de la théorie des cordes et de la physique des particules. Selon lui, il est probablement vrai que l'on est plus exigeant pour recruter un jeune qui voudrait se lancer seul dans une voie nouvelle, mais il n'y a pas de censure réelle. En tout cas, un chercheur en poste est libre.

On aimerait pouvoir comprendre plus en profondeur cette prometteuse théorie des cordes, pour juger par nous-mêmes. Mais, comme souvent avec les livres de vulgarisation, on reste un peu sur sa faim. On aimerait approfondir. Mais quelle difficulté !

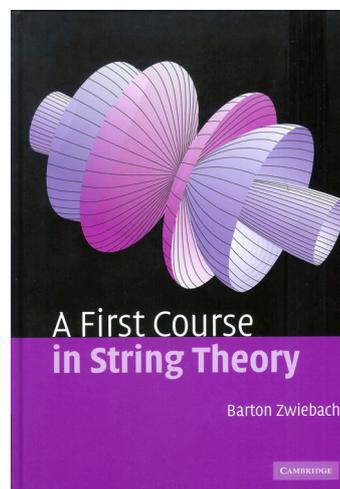
A first course of string theory !

Barton Zwiebach

Cambridge University Press

ISBN 978-0-52-183143-7

Si la présentation précédente vous a donné envie d'en savoir plus sur la théorie des cordes, Costas Bachas nous a recommandé le livre de Zwiebach.



Mais attention, le livre est en anglais et il est réservé à des personnes ayant un très bon bagage en math et physique. Le livre coûte environ 60 euros.

La Marquise va avoir du pain sur la planche. Mais entre nous, quand la Marquise du Châtelet traduisait Newton, ça ne devait pas être très facile non plus.

Les kiosques s'enrichissent

Si la Marquise veut se délasser intelligemment après la lecture de la théorie des cordes, elle peut aller acheter la revue de la SAF, "l'Astronomie", disponible maintenant dans les kiosques.

Bravo pour cette promotion attendue !

LA VIE ASSOCIATIVE

Opération "Sidereus Nuncius"

Nous avons reçu un premier financement de 10000 euros pour l'opération "Sidereus Nuncius", proposée comme action "Sciences à l'École" pour l'Année Mondiale de l'Astronomie en 2009. Le projet est conduit en collaboration avec la Société Astronomique de Lyon (SAL) et le Service de Diffusion des Connaissances de l'Observatoire de Lyon (SDC).

Le projet consiste en ceci :

- Concevoir un kit pédagogique itinérant, sur le thème des observations et découvertes de Galilée
- Trouver les partenaires pour la diffusion de ce kit en 2009

Le kit pédagogique sera conçu pour que les élèves soient actifs. Des copies du kit seront prêtées pour une semaine environ aux établissements scolaires sélectionnés. Elles seront accompagnées des éléments (panneaux, maquettes) permettant de monter une petite exposition statique dans l'établissement d'accueil, pendant le temps du prêt.

Le kit pédagogique couvrira les thèmes suivants :

- La lunette de Galilée
- Les observations de la Voie Lactée
- L'observation de la Lune
- L'observation de Jupiter

Ces quatre thèmes reprennent exactement le livre "Sidereus Nuncius" auxquels nous ajoutons :

- Observation du Soleil
- Observation de Vénus
- L'isochronisme d'un pendule
- La chute des corps.

Engagez-vous !

Nous recherchons des personnes qui accepteraient de superviser la circulation du kit en 2009. Voici ce qu'il y aurait à faire :

En 2008 : trouver et sélectionner des établissements scolaires de leur région qui accepteraient d'accueillir le kit en 2009 (ce sera gratuit).

En 2008 : se familiariser avec la manipulation du kit, pour pouvoir compléter, le cas échéant, les informations données par les fiches d'accompagnement. Des stages seront proposés pour cette formation.

En 2009 : veiller à la bonne circulation du kit d'un établissement à l'autre.

A la fin de l'opération, Il sera demandé une centralisation des résultats pour l'édition d'un travail collectif sur ce "Sidereus Nuncius". **G.P.**

Questionnaire

Chères et chers amis du CLEA,

Les Cahiers Clairaut existent depuis maintenant plus de 30 ans et Georges Paturel en est le rédacteur en chef depuis 5 ans. C'est un gros travail et vous avez pu voir la qualité du résultat. Il ne souhaite pas continuer après 2008. Il est effectivement préférable que la présidence du CLEA et la gestion des Cahiers Clairaut soient dissociées. Suite à sa demande, nous essayons de monter une équipe pour prendre la relève du rédacteur en chef.

Ce questionnaire nous permettra tout d'abord de mieux connaître vos attentes. Nous avons repris pour cela de nombreuses questions de l'enquête qu'avait réalisée Martine Bobin en 2002.

Mais nous voudrions aussi en profiter pour faire appel aux adhérents pour aider à la réalisation de ces Cahiers Clairaut. Si les nombreuses tâches sont partagées, le travail en sera moins lourd pour chacun. Nous souhaiterions répartir les tâches entre un rédacteur des CC, des rédacteurs-adjoints responsables d'une ou plusieurs rubriques, des relecteurs, des auteurs d'articles et des personnes faisant de la mise en pages. Si vous pensez pouvoir relire des articles ou faire de la mise en page, n'hésitez pas à vous proposer. Si vous avez réalisé une observation avec des élèves, une maquette..., votre expérience peut intéresser d'autres collègues, n'ayez pas peur d'écrire un papier, nous avons besoin d'articles très simples. Mais nous avons aussi besoins d'articles de spécialistes. C'est dans le rôle du CLEA de mêler enseignants et astronomes, spécialistes de l'astrophysique et professionnels de la pédagogie, enseignants en école primaire et en université, les Cahiers Clairaut doivent refléter cette diversité...

Merci d'avance pour vos réponses que nous espérons nombreuses.

Si nous avons votre adresse électronique, vous avez dû recevoir ce questionnaire par Internet et vous pouvez donc y répondre par courrier électronique à : larcher2@wanadoo.fr AVANT LE 15 avril 2008. Sinon, vous pouvez le télécharger à l'adresse : <http://clea-astro.eu>

Mais vous pouvez aussi répondre par lettre en adressant ce questionnaire AVANT LE 15 avril

2008, à Christian Larcher 19bis, rue de Verdun 94170 LE PERREUX SUR MARNE.

Christian Larcher, Jean Ripert, Pierre Causeret

L'astronomie dans les programmes de sciences physiques au collège

Gilles Rémy nous a envoyé le texte intégral des programmes scolaires. Il est assez difficile d'en extraire ce qui a trait à l'astronomie. Christophe Gosselin l'a fait sous une forme très condensée, que nous vous donnons ci-dessous.

En 5^{ème} :

- Les sources de lumières : Différence entre sources primaires (Soleil, étoiles,...) et sources secondaires (planètes, satellites,...).
- Ombre propre, ombre portée et cône d'ombre : phases de la Lune et éclipses (de Lune et de Soleil).

- Système Soleil-Terre-Lune : Lune/Terre et Terre/Soleil.

En 4^{ème} :

- Lentilles minces : foyers et images.
- Vitesse de la lumière : ordres de grandeur de distances de la Terre à quelques étoiles et galaxies dans l'Univers ou des durées de propagation de la lumière correspondantes.

En 3^{ème} :

- Observation et description du mouvement d'un objet par référence à un autre objet : Trajectoire, vitesse,...
- Relation entre poids et masse d'un objet : poids d'un objet sur la Terre et sur la Lune.

Pour mémoire, il n'y a plus de physique-chimie en classe 6^{ème}.

LE COURRIER DES LECTEURS

La précession des équinoxes

En ce qui concerne Hipparque et la précession des équinoxes, je pense qu'on devrait insister davantage sur ce qui me paraît prodigieux, à savoir que, avant même de faire toute mesure, d'une part Hipparque avait une idée du phénomène et d'autre part, je pense, mais cela n'engage que moi, il en connaissait un ordre de grandeur.

À défaut de disposer d'une horloge précise, il disposait d'une "horloge" qui avait fonctionné longtemps. Environ 2000 ans auparavant, le Soleil, lors de l'équinoxe de printemps était dans le Taureau alors qu'à son époque il était dans le Bélier. Hipparque en avait certainement connaissance. En gros une constellation de décalage en 2000 ans soit environ 30 degrés en 2000 ans ce qui donne 54" par an. À partir de là on peut envisager de faire des mesures plus précises et d'affiner le résultat.

Si on voulait faire maintenant des mesures de positions du Soleil sur l'écliptique avec des moyens rudimentaires, il suffirait, à défaut de disposer d'une éclipse de lune, d'observer le passage du Soleil au méridien puis de noter le point de l'écliptique qui passe au méridien 12 heures plus tard. Évidemment Hipparque n'avait pas d'horloge précise pour mesurer ces 12 heures, mais s'il se trompe de 5 minutes, l'erreur est inférieure au centième. Maintenant, avec des horloges beaucoup plus précises, on aura une mesure satisfaisante dans la mesure où on sera sûr d'être bien dans le plan

méridien du lieu. D'où l'importance des lunettes méridiennes au cours de l'histoire.

Youri GAUTIER

Belle comète

Notre ami Daniel Bardin nous a envoyé une superbe photographie de la comète 17P/Holmes prise dans les proches faubourgs de Marseille, le 29 novembre 2007 à 18h40 T.U., avec un boîtier Nikon D.100 à 800 Iso, optique Nikkor f=300 mm, ouverture 4,5 et pose de 30 secondes.



Risque de polémique et errata

Nous voulons présenter nos excuses à A.-M. Louis pour ne pas avoir publié, comme nous nous étions engagés à le faire, sa critique sur l'article pour les maternelles du CC119. En fait, les auteurs mis en cause ont demandé un droit de réponse. J'ai donc conseillé aux opposants de se mettre d'accord hors des lignes des CC.

Par ailleurs, dans mon commentaire de dernière minute, je prônais l'utilisation du *mot juste* quand il est accompagné de la *notion juste*. Je ne pouvais pas pour autant les professeurs des écoles à introduire la notion d'ellipse en maternelle ; mais

s'ils le font, autant dire *ellipse* plutôt que, par exemple, "cercle aplati".

Signalons encore deux erreurs dans le CC120 : la photo de la figure 4, en page 11, est de Françoise Suagher et non de J. Ripert. Par ailleurs Francine Billard a été oubliée dans la mention de ce même article au sommaire de la page 1. **G.P.**

Quelques précisions sur l'article de C. Larcher, CC 120, p. 18

Ayant eu le privilège de voir le fonctionnement de l'Observatoire de Haute Provence de l'intérieur et d'utiliser certains instruments (en particulier le spectromètre ELODIE, prédécesseur de SOPHIE), je crois utile d'apporter quelques précisions.

Le rapport signal/bruit mesure le rapport entre l'information reçue de la source observée et les fluctuations de ce signal. Ces fluctuations sont de deux natures, instrumentales et intrinsèques à la nature quantique du rayonnement. Mis à part les erreurs systématiques, facilement corrigeables (courant d'obscurité par exemple), le bruit de photons est en général gaussien, ce qui signifie concrètement que le bruit (plus précisément son écart type) décroît comme l'inverse la racine carrée du temps d'intégration. Hors, la qualité des récepteurs (transparence et rendement) s'est grandement amélioré entre la conception d'ELODIE et celle de SOPHIE. Ainsi, le gain dans la bande V (550 nm) est estimé à 3 magnitudes en mode haute efficacité, et 2 magnitudes en mode haute résolution. Autrement dit, on peut observer en un temps raisonnable des étoiles plus faibles avec SOPHIE. Ou, pour une étoile donnée, on obtient un rapport signal/bruit identique en un temps d'intégration beaucoup plus court. Une illustration de ce gain est donnée sur le site Web de l'OHP : [.../www/guide/sophie/Zeta_Per_comparaison.jpg](http://www.guide/sophie/Zeta_Per_comparaison.jpg)
L'étude de l'évolution des profils de raies concerne surtout de la physique stellaire, et encore peu la

recherche d'exoplanètes, du moins directement. Ainsi l'écart à des profils symétriques permet de mettre en évidence des mouvements dans l'atmosphère des étoiles (mouvements convectifs à grande échelle, éjection de matière). Mais ce sont aussi des diagnostics de l'activité des étoiles (taches, par exemple) qui peuvent perturber la détection des exoplanètes, voire engendrer de fausses détections. En effet, les exoplanètes sont essentiellement détectées par la mesure des variations de la vitesse radiale de l'étoile, qui tourne autour du centre de gravité du système étoile – planète. Cette vitesse radiale est mesurée à partir du décalage Doppler des raies photosphériques ... et l'activité d'une étoile fait fluctuer la position de certaines raies ! En ce sens, une bonne connaissance de l'activité stellaire (et donc l'étude des profils de raies) est importante pour la recherche d'exoplanètes.

En ce qui concerne la synergie entre SOPHIE et le satellite COROT, elle se fait selon deux approches. D'une part, des observations spectroscopiques avec SOPHIE permettent de déterminer précisément les paramètres fondamentaux (température, gravité de surface, composition chimique) des étoiles cibles de COROT, qui ne fait « que » de la photométrie. En ce qui concerne l'astérosismologie, SOPHIE permet d'étudier des étoiles trop brillantes pour COROT. Ainsi, Procyon a d'ores et déjà été étudiée avec SOPHIE, et les résultats ont été publiés ce mois-ci.

Eric Josselin, GRAAL, Université Montpellier II ■

Nous avons appris le décès de Charles Fehrenbach, le 9 janvier 2008, à l'âge de 94 ans. Il fut fondateur et directeur de l'OHP. Nous évoquerons prochainement la technique du prisme objectif qu'il a contribué à développer.

Le mot du trésorier

Mes remerciements vont à tous les lecteurs et lectrices attentifs qui se sont réabonnés.

Merci à celles et ceux qui nous ont souhaité une Bonne Année avec de belles observations astronomiques et qui parfois ont ajouté des encouragements. J'en cite quelques-uns Philippe Malburet "... *Merci pour tout ce qui est fait au CLEA, c'est véritablement indispensable pour la diffusion culturelle en astronomie ...*" ou Charles-Henri Vigouroux "... *un grand merci à toute l'équipe des Cahiers Clairaut, toujours très riches et instructifs en restant agréables à lire avec un bon côté sympa et convivial ...*" et je termine par un abonné récent Stéphane Verjux "... *c'est toujours un grand plaisir de lire la revue que j'attends avec impatience. Merci pour ce petit plaisir. Qu'il est bien agréable de partager, de faire partager à mes élèves et mon entourage*"

Cela fait du bien aux membres du Bureau qui parfois se sentent bien seuls.

N'hésitez pas à vous exprimer (merci de répondre nombreux au questionnaire), à nous faire part de vos expériences, de vos réussites et vos échecs, de vos tâtonnements. C'est aussi cela la vie de l'association. **J.R.**

Solution du remue-méninges

Ce grillage n'est autre qu'un morceau du miroir du grand radiotélescope de Nançay (voir la couverture). La maille de ce grillage est de 1,25 cm. Il est donc possible d'observer des longueurs d'onde de 10 à 12 cm. Une grande spécialité de Nançay est l'observation de la raie de l'hydrogène neutre, à 21 cm de longueur d'onde.

Notez quand même que ce grillage est de grande qualité ; chaque intersection de fil est soudée. Le radio télescope de Nançay a nécessité environ 20 000 m² de ce grillage. La surface du miroir doit être réalisée avec une précision également de l'ordre du centimètre, ce qui est une gageure pour une telle surface.

Un autre problème est l'entretien du grillage, la peinture en particulier.



Tentative de réponse à la question subsidiaire : En 2006 la couverture montrait une lunette astronomique, en 2007 la couverture montrait un télescope à miroir aluminé, cette année, en 2008, la couverture montre un radiotélescope à miroir grillagé. La progression présente trois techniques différentes de collecte de lumière. La suivante pourrait être un télescope spatial, même si c'est plus la localisation que la technique qui détermine ce nouveau mode d'observation. On peut penser aussi à une présentation de la technique multi-miroirs, soit sous forme d'un télescope à mosaïque de miroir, comme celui installé à l'Observatoire Mac Donald du Texas, soit un système interférométrique à plusieurs télescopes, comme le VLT de Paranal au Chili. On pourrait imaginer aussi de présenter un détecteur d'ondes gravitationnelles...

Solution horizontale des mots croisés: I : commençans II : Orion - Au III : Saros - Naos IV : MC - No V : Olé - Cari VI : Décalage VII : Hyades VIII : Omo - Drus IX : Mesa - Asana X : Es -Nec.

Solution verticale des mots croisés: 1 :Cosmodrome 2 : Oracle - Mes 3 : Mir - Échos 4 : Moon - Ay - an 5 : ENSO - Lad 6 : Cadran 7 : Nuageuse 8 : Ressac 9 : Nao 10 : Suse - Novae.

Jipé

Articles à venir

Utilisation du spectro LHIRES - Les ondes gravitationnelles - Cours élémentaire de statistiques et les finesses de la régression linéaire - L'orbilune - La nébuleuse du Crabe revisitée - Le chaos - La sismologie stellaire - Le Solarscope - L'étoile laser artificielle - Mesure de la distance Terre Lune par la méthode de Ptolémée.

RE-ABONNEMENT ET/OU D'ADHESION

Pour vous abonner aux Cahiers Clairaut et/ou adhérer au CLEA en 2008, envoyez **l'information** ci-dessous avec **un chèque** à l'ordre du CLEA à :

Jean RIPERT, C.L.E.A.

Impasse des Mouyracs

46090 PRADINES

VOTRE NUMERO D'ABONNE (voir sur l'enveloppe d'expédition) :

E-MAIL :

NOM (en lettres capitales) :

PRENOM :

RUE :

CODE POSTAL

VILLE :

ABONNEMENT AUX CC EN 2008 ----- 30 €

ADHESION AU CLEA EN 2008 ----- 5 €

TOTAL :

Nous remercions Jean-Noël Terry, Marie-Agnès Terry, Michel Bobin , Anne Marie Paturel pour la relecture de ce Cahier.