

# Les Cahiers Clairaut

## Été 2007 n° 118

### EDITORIAL

Comme d'habitude, nous avons essayé de panacher les articles faciles à lire et les articles plus techniques (voir l'article page 40), même si cette fois-ci, il y a plusieurs articles très calculatoires.

Tout d'abord, nous poursuivons le cours sur la trigonométrie sphérique pour pouvoir déboucher bientôt sur des applications simples, entrevues à la fin de l'article.

Après l'aspect historique de la découverte de l'expansion de l'Univers, nous abordons un problème ouvert avec le mystère de la matière noire ou de l'énergie noire. Ce sujet, très attendu, sera abordé à nouveau ultérieurement sous un jour plus pratique pour fournir des exercices concrets sur le sujet.

Nous revenons aussi, plus en détail, sur l'article historique du tracé de la trajectoire de la Terre et de Mars, par Kepler, avec un article qui poursuit les applications que l'on peut faire à partir du site de l'IMCCE.

Nous découvrons une curiosité avec l'étude du rebond d'un corps lâché verticalement, article qui par certains aspects fait écho à l'article historique sur l'idée d'un puits traversant la Terre.

**La Rédaction**  
 patu@obs.univ-lyon1.fr

**Cours** : Trigonométrie sphérique II : distance angulaire entre deux astres  
 G. Paturel p. 2

**Histoire**  
 À l'aube de la découverte de l'expansion de l'Univers : mesure de la vitesse radiale des galaxies par Vesto Slipher  
 A. Bremond p. 5

**Article de fond**  
 Le côté obscur de l'Univers  
 A. Arbey p. 13

**Histoire**  
 Le puits et le pendule  
 P. Lerich p. 18

**Curiosité**  
 Mouvement des projectiles dans des trajectoires proches de la verticale  
 B. Simon p. 20

**Avec nos élèves**  
 Les orbites de la Terre et de Mars : la première loi de Kepler  
 B. Sandré p. 24

### Logiciels

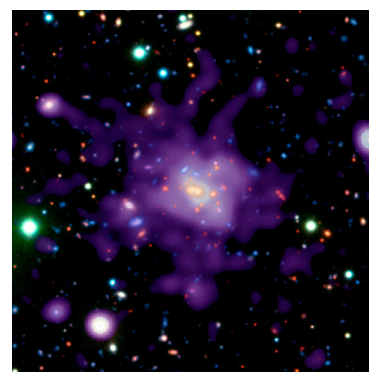
Stellarium : un planétarium dans votre ordinateur  
 J.-N. Terry p. 30

**Avec nos élèves**  
 Détection de planètes extrasolaires : Correction de l'exercice du CC117

E. Wernli, G. Paturel p. 32

### Rubriques fixes p.34

- **Remue-méninges**
- **Lecture pour la Marquise**
- **Les potins de la Voie Lactée**
- **La vie associative**



Un amas de galaxies dont le rayonnement X (en violet) permet de voir l'emplacement du gaz chaud.

# COURS

## Trigonométrie sphérique : II distance angulaire entre deux astres

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

**Résumé :** Nous avons vu la dernière fois les bases de la trigonométrie sphérique, avec une application au calcul de la distance zénithale d'un astre. Nous présentons maintenant une nouvelle application : le calcul de la distance angulaire entre deux astres de coordonnées connues.

### Introduction

La nouvelle application de la trigonométrie sphérique que nous présentons aujourd'hui sera très utile à l'observateur qui veut savoir, par exemple, à quelle distance de la Lune ou du Soleil se trouve un astre donné. Même pour l'observation "en chambre" avec un logiciel comme Stellarium (voir l'article de J.-N. Terry dans ce numéro), il peut être intéressant de calculer la distance qui sépare deux étoiles (nous aurons bientôt l'occasion de voir un exemple pratique avec un tel logiciel). C'est une application simple qui utilise directement une des relations du Groupe de Gauss, vu dans l'article précédent.

### Posons le problème

Sur la surface de notre sphère céleste de rayon unité, nous avons deux astres  $E_1$  et  $E_2$  de coordonnées équatoriales  $(\alpha_1, \delta_1)$  et  $(\alpha_2, \delta_2)$  respectivement. Notons que le calcul serait identique avec d'autres coordonnées, mais les coordonnées équatoriales sont les plus communément utilisées dans les catalogues.

La figure 1 illustre la situation. Le point P donne la direction du pôle Nord terrestre ; le plan horizontal est le plan de l'équateur, perpendiculaire à la direction des pôles. L'origine des ascensions droites est le point  $\gamma$ , situé sur l'intersection du plan de l'équateur et du plan de l'écliptique (non représenté sur la figure) dans la direction où le Soleil passe de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord, dans sa course apparente autour de la Terre (c'est ce qu'on appelle le nœud ascendant car la déclinaison du Soleil y est nulle mais croissante). Nous cherchons à calculer l'arc de grand cercle  $(E_1, E_2)$  qui mesure la séparation angulaire des deux

astres. Les déclinaisons sont mesurées par rapport au plan équatorial, de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$ . Les ascensions droites sont mesurées dans le plan équatorial, dans le sens direct (sens contraire au sens des aiguilles d'une montre), de 0h à 24 h, à partir du point  $\gamma$ .

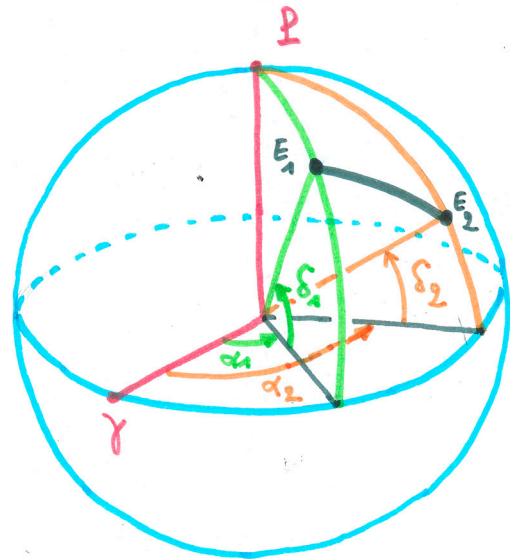
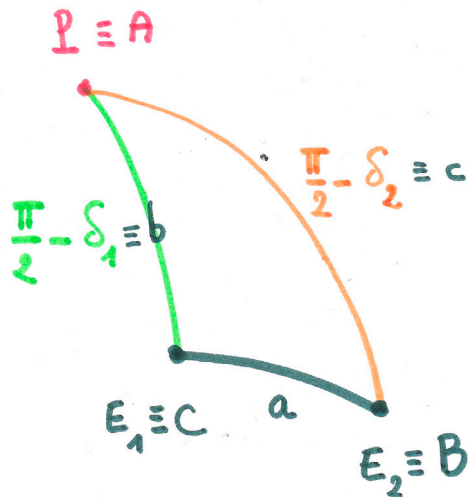


Figure 1 : Deux astres  $E_1$  et  $E_2$  sont repérés en coordonnées équatoriales  $(\alpha_1, \delta_1)$  et  $(\alpha_2, \delta_2)$  respectivement. Nous cherchons à calculer l'arc de grand cercle  $(E_1, E_2)$

### Résolution du triangle sphérique

Nous allons résoudre le triangle sphérique  $PE_1E_2$  pour déduire l'arc  $(E_1, E_2)$ . Traçons le triangle sphérique en question en identifiant les sommets avec les notations standards du cours précédent.



Appliquons la troisième relation du groupe de Gauss (relation G3)

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A$$

En remplaçant  $b$  par  $(\pi/2 - \delta_1)$ ,  $c$  par  $(\pi/2 - \delta_2)$  et en notant que l'angle au sommet  $A$  n'est autre que  $(\alpha_2 - \alpha_1)$ , on obtient la relation qui donne directement le cosinus de  $a$ , l'arc cherché :

$$\cos a = \sin \delta_1 \cdot \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1).$$

Notez que la différence des ascensions droites  $\alpha_2 - \alpha_1$  n'intervenant que par le cosinus, son signe n'a pas d'importance. Vous pouvez prendre  $\alpha_2 - \alpha_1$  tout aussi bien.

Reste à tirer la valeur de  $a$  de la valeur de son cosinus. Il suffit de prendre la fonction arc-cosinus pour trouver l'arc dont le cosinus vaut  $\cos a$ .

L'arc-cosinus est compris entre 0 et  $\pi$ , bornes comprises. L'arc  $(E_1, E_2)$  calculé sera le plus petit arc. En effet, nous pourrions vouloir calculer le grand arc, en considérant l'autre partie du grand cercle. Bien que l'intérêt pratique soit discutable, nous l'obtiendrons simplement par  $2\pi - a$ .

## Applications concrètes

Nous commencerons par vérifier les cas triviaux pour nous assurer que les résultats sont cohérents : Entre le pôle nord ( $\delta_1 = 90^\circ$ ) et une étoile à l'équateur ( $\delta_2 = 0^\circ$ ), quelle que soit l'ascension-droite  $\alpha$ ,

l'application de la relation donne  $\cos a = 0$ , donc  $a = 90^\circ$ , ouf<sup>1</sup> !

Enfin, la distance entre le pôle nord ( $\delta = 90^\circ$ ) et le pôle sud ( $\delta = -90^\circ$ ), quelle que soit  $\alpha$ , conduit à  $\cos a = -1$ , c'est-à-dire  $a = 180^\circ$ . Nous sommes heureux !

Venons en à un cas moins trivial. Je vous montre une photo de la Lune dérivée de mon logiciel de simulation (en l'occurrence Skychart, mais vous pourriez le faire avec Stellarium).



Vous voyez la Lune le 13 mai 2007. En 2h10min, la position apparente de la Lune va se déplacer de l'étoile HD253 jusqu'à l'étoile HD633. Quel a été son déplacement angulaire réel ?

Les coordonnées équatoriales des étoiles sont (pour 2007) :

$$\text{HD253} : \alpha_1 = 0^{\text{h}} 07^{\text{m}} 42^{\text{s}} ; \delta_1 = 1^\circ 42' 22''$$

$$\text{HD633} : \alpha_2 = 0^{\text{h}} 11^{\text{m}} 03^{\text{s}} ; \delta_2 = 2^\circ 05' 47''$$

Convertissons les angles sexagésimaux en degrés décimaux.

On trouve :

$$\text{HD253} : \alpha_1 = 0,12833^{\text{h}} = 1,9250^\circ ; \delta_1 = 1,7061^\circ$$

$$\text{HD633} : \alpha_2 = 0,18417^{\text{h}} = 2,7625^\circ ; \delta_2 = 2,0964^\circ$$

L'application de notre relation conduit alors simplement à :  $\cos a = 0,99987$  c'est-à-dire :  $a = 0,923562^\circ = 0^\circ 55' 24,8''$ .

Comment savoir si ce calcul est exact ? La période sidérale de la Lune étant de 26,3 jours, on en déduit facilement que, en 2h10min, la Lune devrait se déplacer de  $1,1895^\circ$ . L'ordre de grandeur est correct. Mais d'où vient la différence ? Nous verrons prochainement que c'est un effet de parallaxe dont nous pourrions tirer la distance Terre-Lune par la méthode de Ptolémée.

<sup>1</sup> Rappelez-vous que l'arc-cosinus est compris entre 0 et  $90^\circ$ . La solution  $-90^\circ$  est donc exclue, bien que son cosinus vaille zéro.

# HISTOIRE

## À l'aube de la découverte de l'expansion de l'Univers : mesures de la vitesse radiale des galaxies par Vesto Slipher (1912-1925)

Alain Brémond, Université Claude Bernard Lyon 1, LIRDHIST.

**Résumé :** *Des mesures ont été à l'origine d'un changement de paradigme sur l'Univers. D'abord considéré comme tout entier contenu dans la Voie Lactée, l'Univers s'élargit aux univers-îles suggérés par Kant en 1755. L'astronome américain Vesto Slipher, en mesurant dès 1913 les vitesses radiales des nébuleuses spirales montre que ces objets sont probablement indépendants des autres objets célestes qui eux forment la Galaxie. Ces travaux, très vite acceptés par les astronomes seront utilisés par les premiers cosmologistes théoriciens, en particulier Wilem de Sitter et Georges Lemaître à l'appui de leurs hypothèses et de leurs calculs.*

### Introduction

L'utilisation de télescopes par les astronomes leur a permis de découvrir, à côté des planètes, des comètes et des étoiles, des objets flous qu'ils nomment nébuleuses. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, Emmanuel Kant (1724-1804) suggère qu'il pourrait s'agir d'ensembles d'étoiles, identiques à notre propre système appelé la Voie Lactée (Galaxie) et qu'après lui on appelle des « univers-îles ». Pour d'autres, comme Pierre-Simon Laplace (1749-1827), elles pourraient constituer des systèmes solaires en formation. Depuis les observations de ces nébuleuses par Lord Rosse (1800-1867) en 1844, qui utilisait un télescope de 1,80 mètres de diamètre, le Léviathan, les astronomes isolent parmi les objets nébuleux un groupe particulier appelé les nébuleuses spirales. James Keeler (1857-1900) (9) qui travaille à l'observatoire Lick aux États-Unis, les a étudiées de façon plus systématique. Il confirme les observations de Lord Rosse. Un certain nombre d'astronomes, encore peu nombreux, pensent que l'hypothèse de Kant devient de plus en plus plausible lorsqu'on observe la forme de ces nébuleuses spirales. Ils cherchent alors à accumuler

des informations sur ces objets célestes. L'astronome anglais William Huggins (1824-1910) (6;7) propose en 1873 d'appliquer la spectroscopie à l'étude des déplacements possibles de ces objets, grâce aux découvertes de Christian Doppler (1803-1853) et Hippolyte Fizeau (1819-1896). Il échoue dans sa tentative, c'est-à-dire qu'il lui est impossible de mettre en évidence un décalage des raies spectrales, dans ces objets de faible éclat. En 1885 survient un événement surprenant, l'apparition d'une étoile nouvelle, une nova, dans la Grande Nébuleuse d'Andromède. Les nébuleuses spirales contiendraient donc des étoiles ? Cette hypothèse se trouve renforcée lorsque les études montrent que leur spectre est tout à fait semblable à celui des étoiles, avec des raies sombres (raies d'absorption selon Kirchhoff (1824-1887) et Bunsen (1811-1899)) alors que d'autres plus diffuses possèdent un spectre de raies colorées (raies d'émission). Reste à franchir un saut qualitatif important qui consiste à admettre que ces systèmes stellaires sont autant d'univers-îles comme notre système stellaire, la Galaxie. C'est dans le premier quart du XX<sup>e</sup> siècle que la question sera tranchée et les travaux de Vesto Slipher (1875-

1969) apparaissent comme un apport majeur dans la discussion à laquelle participeront immédiatement de nombreux astronomes.

Cette étude vise à remplir trois objectifs. Retracer de manière critique l'histoire des mesures des vitesses radiales des nébuleuses spirales représente la première étape indispensable. Puis nous étudierons les conséquences qu'ont tiré de ces observations Vesto Slipher et les autres astronomes intéressés par cette question. Enfin nous analyserons la place de ces observations dans le cadre du concept de révolution scientifique de Thomas Kuhn (1922-1996) et en particulier la remise en cause du paradigme dominant sur la structure de l'Univers, ainsi que les relations qu'ont pu avoir ces travaux avec le développement de la cosmologie théorique selon Albert Einstein (1879-1955), Willem de Sitter (1872-1934) et Georges Lemaître (1894-1966).



Copyright : Flagstaff Observatory

*Le jeune astronome Vesto Slipher en 1905, peu de temps après son arrivée à l'Observatoire de Flagstaff.*

## Étude historique

### Des nébuleuses spirales se déplacent à grande vitesse

Quand Vesto Slipher rejoint, en 1901, l'observatoire construit par Percival Lowell (1894-1916) à Flagstaff en Arizona, il s'aperçoit très vite que le matériel dont il dispose devrait lui permettre de mesurer les déplacements des nébuleuses suggérés par Huggins. Ses travaux sur les mouvements des planètes et des étoiles le confortent dans cet espoir. Ce n'est cependant qu'en 1912 qu'il pourra réaliser la première mesure. En effet, les difficultés sont nombreuses. Bien qu'il choisisse la plus grande des nébuleuses spirales, celle de la constellation d'Andromède, la faiblesse de son éclat et son

caractère diffus rendent l'étude spectrale difficile. La mesure de la vitesse radiale impose de comparer la longueur d'onde d'une même raie spectrale située dans la nébuleuse et dans un spectre de référence. Pour obtenir une bonne résolution spectrale il faut disperser le spectre et obtenir ainsi des raies bien séparées les unes des autres. Malheureusement, cette dispersion rend plus pâle chacune des raies et la plaque photographique risque de ne pas être suffisamment impressionnée. Slipher dispose d'un télescope de 24 pouces et d'un appareil photographique à courte focale mais il lui manque une fente assez large pour laisser passer assez de lumière et un prisme suffisamment dispersif. Ce matériel arrive à Flagstaff au cours de l'été 1912. Les spectres de comparaison sont ceux du fer et du vanadium. La plaque photographique est une Seed 30, une des plus rapides de l'époque. Les spectres sont analysés avec un stéréocomparateur de Hartmann sous un grossissement de 15 fois. Le 17 septembre, la première vitesse radiale est obtenue après une pause de 6 heures 50 minutes. Slipher réalise trois autres mesures jusque dans la nuit du 31 décembre. Il doit arrêter là ce travail car le télescope est alors utilisé pour d'autres observations. Il ne peut donc établir la précision de ses mesures mais il estime que la faible dispersion de ses quatre évaluations atteste de leur validité. Il ne peut non plus réaliser son projet qui consistait à utiliser un spectrographe plus dispersif, et donc plus précis, formé de trois prismes en verre de flint.

Sa découverte est étonnante : la nébuleuse d'Andromède se rapproche du système solaire à la vitesse moyenne de 300 km/s. Aucune autre hypothèse qu'un déplacement ne peut expliquer le décalage spectral observé. Dès lors Vesto Slipher consacre une grande partie de son temps à ce type d'étude afin de vérifier si toutes les nébuleuses spirales ont des déplacements aussi rapides.

### Les sens de déplacement et les vitesses ne sont pas identiques

Il lui faut aussi vérifier si, parmi les nébuleuses, seules les spirales sont animées d'une vitesse aussi grande. En effet, les vitesses radiales des étoiles sont environ 25 fois plus faibles que celle de la nébuleuse d'Andromède. Son programme de travail consiste donc à mesurer des vitesses radiales d'autres spirales mais aussi de nébuleuses gazeuses et d'amas globulaires. Pour cela le matériel reste le même car Slipher s'est aperçu qu'il convenait particulièrement bien à ce travail. En deux ans, ce sont environ quarante nébuleuses et amas stellaires qui sont étudiés(20). Parmi eux quinze sont des

nébuleuses spirales. Plusieurs constatations découlent de ces mesures. D'abord si deux nébuleuses se rapprochent du Soleil (vitesse négative), toutes les autres s'en éloignent (vitesse positive). Les vitesses sont toutes élevées, allant de 200 à 1 100 km/s. Les deux qui se rapprochent du système solaire sont situées au sud de la Voie Lactée. Vesto Slipher pense d'ailleurs qu'avec un plus grand nombre d'observations il en trouvera encore plus avec une vitesse négative dans la partie sud de l'hémisphère. Son hypothèse est en effet qu'il existe un déplacement dans une direction donnée (*drift hypothesis*). Les trois spirales les plus rapides sont vues par la tranche ; c'est, selon Slipher, que les spirales se déplacent dans ce plan et le vecteur vitesse est donc largement situé dans l'axe de vision. Au contraire, lorsque les nébuleuses spirales sont plus inclinées, nous ne mesurons qu'une composante de cette vitesse qui est ainsi plus faible. En fait cette impression n'est pas confirmée par la répétition des observations.

### Vérifications et controverses

D'autres astronomes s'emploient à reproduire les mesures de Slipher et lui communiquent leurs résultats. Wolf (1827-1918) à Heidelberg, Wright (1871-1959) à l'observatoire Lick produisent des mesures très voisines des siennes pour la nébuleuse d'Andromède. Pease (1881-1938) au Mont Wilson (14) mesure N.G.C.<sup>1</sup> 4594 et trouve une valeur de +1180 km/s, proche des +1100 trouvés par Slipher. Moore (1878-1949) à Lick étudie la nébuleuse Messier<sup>2</sup> 77 (N.G.C. 1068). Les mesures sont ici discordantes : 1 100 km/s pour Slipher, 765 pour Pease(13) et 910 pour Moore, mais cette spirale possède un éclat plus faible.

La critique la plus virulente vient de Reynolds (15), un spécialiste des vitesses radiales des étoiles. Tout en commençant sa lettre à propos de mesures faites dans son propre observatoire, au Mont Wilson, il s'attaque en réalité directement à Vesto Slipher. Il doute de la possibilité d'obtenir, pour les nébuleuses, des mesures fiables, et considère que les mesures de vitesses des nébuleuses « *n'ont pas le même poids que celle des étoiles, beaucoup plus brillantes* ». Selon lui le spectrographe utilisé par Slipher ne serait pas assez dispersif comparé à celui du Mont Wilson dont l'échelle linéaire est de 4,3 mm entre les longueurs d'onde 3930Å et 4950Å. Et même dans ce cas, Reynolds fait remarquer qu'un

déplacement de 0,1 mm correspond à une vitesse de 90 km/s. Comme il faut, selon lui, 80 heures de pause pour obtenir le spectre, des changements de température et de pression atmosphérique sont suffisants pour entraîner des variations de cette amplitude. Par ailleurs, au Mont Wilson, le spectre de référence est obtenu en une seule fois au cours d'une pause de une seconde et ceci est suffisant, dit-il, pour entraîner une grande erreur. Il illustre ensuite sa critique par les variations de mesure de la vitesse radiale de la grande nébuleuse d'Andromède : -300 km/s pour Slipher et -450 pour Wolf, tout en reconnaissant qu'elles sont proches pour N.G.C. 4594. Reynolds termine sa note en déclarant que pour l'instant, on ne peut pas considérer les vitesses des nébuleuses comme définitivement acquises. Slipher répond (17) point par point dans une lettre à l'éditeur où il fait remarquer que la grande vitesse des nébuleuses comparée à celle des étoiles suppose des décalages spectraux plus grands. Ainsi, la plus faible résolution spectrale est compensée par un décalage plus important. Slipher précise en outre que son matériel est systématiquement testé sur des objets de vitesse connue. Enfin, les spectres de référence sont obtenus et superposés aux spectres de chaque nébuleuse tout au long de la longue exposition et pas seulement, comme au Mont Wilson, en fin d'exposition. La variabilité inter-observateurs est, pour lui, la même que pour les étoiles soit environ 20%. En effet, rétorque-t-il, la concordance des quatre observations des vitesses de la nébuleuse d'Andromède est aussi bonne que celle donnée pour l'étoile Canopus dans le catalogue des vitesses stellaires de Campbell (1862-1938), un spécialiste reconnu par tous. Et Vesto Slipher de conclure : « *Nous serions vraiment très heureux en science si l'imprécision de l'observation n'était pas supérieure à une petite fraction de la quantité observée* ».

La même année, il présente une nouvelle étude dédiée à la nébuleuse N.G.C. 1068 (M77)(18) où il reprend tous les problèmes soulevés par Reynolds à propos de la précision des mesures et discute les discordances observées avec celles de Pease et de Moore. Il a maintenant réalisé six mesures dont trois avec un spectrographe formé de deux prismes et une fente plus étroite. La dispersion du spectre est plus grande et les raies plus fines. Les mesures répondent ainsi à certains des critères de Reynolds. La moyenne des vitesses est de 1 120 km/s avec des extrêmes compris entre 1 060 et 1145 km/s. Le problème des discordances ne lui paraît pas de nature à mettre en doute sa découverte fondamentale, la très grande vitesse radiale de ces

<sup>1</sup> N.G.C. New General Catalog de Dreyer. Il remplace le General Catalog des Herschel.

<sup>2</sup> Charles Messier a publié au XVIII<sup>e</sup> siècle un catalogue d'objets nébuleux encore utilisé de nos jours.

nébuleuses par rapport à celles des étoiles. Dans cette optique Slipher rappelle encore la concordance des données pour les vitesses de la nébuleuse d'Andromède et plus récemment pour celles de N.G.C. 4594. Campbell et Paddock (1919-1955) (2) utilisant les clichés de Heber D. Curtis (1872-1942), réalisés à Lick, mesurent la vitesse d'une autre spirale N.G.C. 4151 et trouvent qu'elle s'éloigne à 940 km/s avec une erreur estimée à 30 à 40 km/s.

Au cours de cette même année, le 13 avril 1917, Slipher est invité à donner une conférence sur les nébuleuses(16). Il rappelle la difficulté à obtenir un spectre pour ces nébuleuses en signalant que Pease avec le grand télescope du Mont Wilson a dû poser 80 heures pour obtenir le spectre de N.G.C. 4594 et que la question de la précision n'est pas résolue par une grande ouverture. Il obtient en effet de bons spectres avec un modeste télescope de 24 pouces et des expositions de « seulement » 20 à 40 heures réparties sur plusieurs nuits.

En 1917, la controverse sur la précision des mesures semble close et les astronomes admettent les résultats de Vesto Slipher. Ainsi la mesure des vitesses radiales prend-elle place comme un paramètre valide, à côté de leurs aspects morphologiques et de leur type spectral.

En 1921 Slipher mesure la vitesse radiale d'une nébuleuse très faible, n° 584 du catalogue de Dreyer, dans la constellation de la Baleine. Cette découverte est signalée et paraît dans le Bulletin de l'observatoire de Harvard, sous la plume de Solon Bailey (1854-1931) : « *Le télégramme suivant a été reçu du Dr V.M. Slipher, de l'Observatoire Lowell, Flagstaff, Arizona : - les observations spectroscopiques de l'Observatoire Lowell montrent que la nébuleuse de Dreyer, numéro 584, dans la constellation de la Baleine possède la plus grande vitesse radiale connue, presque 2 000 km/s en récession* ». La vitesse, confirmée est effectivement extrêmement grande 1 100 miles/s soit 1 770 km/s. Compte tenu des hypothèses de l'époque sur l'âge de la Terre évalué par les géologues et de l'idée qu'à un moment, le système solaire et toutes les nébuleuses étaient réunis, cette nébuleuse doit être éloignée de plusieurs millions d'années lumière. Ceci est à l'époque suffisamment incroyable pour que le fait soit rapporté dans le New York Times (19 janvier 1921 p.6).

Une dernière publication en 1922 vient ajouter de nouvelles mesures portant sur des nébuleuses spirales moins brillantes. Les mesures confirment toutes les données antérieures avec de grandes vitesses radiales. Mais alors que Slipher pensait auparavant qu'en multipliant les observations ils trouveraient un nombre plus grand de nébuleuses

avec des vitesses négatives (s'approchant de nous), ses nouvelles observations démentent cette hypothèse sans que Slipher ne fasse aucun commentaire à ce sujet. De même, il ne commente pas une éventuelle relation entre la magnitude des spirales et leur vitesse radiale. Ce que fait Edwin Hubble à la même époque qui interprète la magnitude plus ou moins faible comme un critère de plus ou moins grand éloignement...

### **Quelles conséquences tirent Vesto Slipher et ses collègues de ces observations ?**

Dans son premier article (19) il croit tenir une explication pour la nova observée en 1885 dans la nébuleuse d'Andromède. Il estime que le « voyage » à grande vitesse de la nébuleuse, objet de grande dimension, lui a permis de rencontrer sur son chemin une étoile noire<sup>3</sup> et ce contact aurait « allumé » l'étoile jusqu'ici non visible. Cette hypothèse montre que pour Slipher, en 1913, les nébuleuses spirales sont des objets non stellaires ; d'ailleurs les télescopes ne permettent pas encore de les résoudre en étoiles.

Slipher se pose une question fondamentale : quelle est la part du mouvement du système solaire dans ce déplacement ? Cette question avait été soulevée en 1916 par Paddock(12) qui travaille avec Campbell sur le déplacement du système solaire par rapport à l'ensemble des étoiles. En effet, il s'agit bien d'une vitesse relative entre deux objets qui sont tous deux en mouvement. Slipher connaît les travaux de Campbell qui a montré que le système solaire se déplace par rapport à des étoiles de référence situées de part et d'autre du Soleil. On observe un déplacement du Soleil par rapport aux étoiles dans une direction précise, appelée l'Apex qui se situe dans la constellation d'Hercule. Qu'en est-il du déplacement de ce même système par rapport aux nébuleuses, sachant que certaines ont une vitesse négative<sup>4</sup> et d'autres, plus nombreuses une vitesse positive ? En comparant les mouvements du système solaire par rapport aux étoiles et également par rapport aux spirales, Slipher en déduit que le système solaire se déplace en même temps que les étoiles et forme donc un ensemble lié. Ainsi toutes les étoiles sont elles associées dans un même ensemble : la Galaxie. Cette importante question est également abordée par Young et al. en 1916 (23). Dans l'introduction de leur article, ils considèrent

<sup>3</sup> Les étoiles noires seraient des étoiles de la taille du Soleil mais obscures (Agnes M. Clerke)(3).

<sup>4</sup> La vitesse est comptée négativement lorsque la nébuleuse se rapproche du système solaire et positivement dans le cas contraire.

que si l'hypothèse des univers-îles s'avérait exacte alors notre système, peut être une spirale, se déplacerait dans l'espace à des vitesses du même ordre que les nébuleuses spirales.

Les mesures relatives de vitesse du système solaire par rapport aux étoiles d'une part et par rapport aux spirales d'autre part, semblent donc pour Slipher un argument assez fort en faveur de la théorie des univers-îles : « *notre système stellaire dans sa totalité se déplace et nous entraîne avec lui.* ». Il suggère que les nébuleuses spirales pourraient s'éloigner les unes des autres, mais l'observation d'amas de spirales contredit, pour lui, cette hypothèse. D'autres travaux, en particulier ceux de Edwin Hubble, vont aller dans son sens. Reprenant l'hypothèse nébulaire de Laplace (1749-1827) il déclare : « *il semble que notre système solaire a évolué à partir d'une nébuleuse* », mais remarque cependant que les nébuleuses dont il était question n'étaient probablement pas des nébuleuses spirales.

Les mesures de Slipher viennent donc prendre place, à côté des aspects morphologiques des spirales, comme élément en faveur des « univers-îles ».

Par ailleurs, l'étude des raies spectrales montre à Slipher qu'elles sont inclinées, comme elles le sont dans le corps de Jupiter et dans les anneaux de Saturne. Les nébuleuses sont donc en rotation. Leur inclinaison de 5° correspond à une vitesse de rotation d'environ 300 km/s à 1' d'angle du centre de la nébuleuse. Cette valeur, déclare Slipher, doit être confirmée. Cette rotation se fait dans le sens de l'enroulement des bras (*like a winding spring*). Cette question fera l'objet de nombreux travaux et d'une violente controverse.

### **Rôle des travaux de Slipher sur les théories de l'expansion; Einstein, de Sitter, Eddington et Lemaître 1927**

Cet épisode de l'histoire de l'astronomie occupe une place centrale dans la question de l'expansion de l'Univers. En 1915, Einstein, à partir de la théorie de la relativité générale s'est aperçu que l'Univers devait être en expansion. On sait que pour des raisons philosophiques il a rajouté à son modèle mathématique une constante dite cosmologique qui rendait l'Univers statique. Willem de Sitter, reprenant les équations d'Einstein prédit en 1917 (4) que les ondes lumineuses doivent être étirées dans un modèle d'Univers en expansion, produisant un décalage, vers le rouge des longueurs d'ondes, d'autant plus important que les objets sont plus distants. Ces travaux n'étaient probablement pas

connus de Vesto Slipher qui n'y fait jamais allusion dans ses articles. Slipher parle de mouvements de déplacement des nébuleuses par rapport au système solaire, mais il le fait dans le cadre de la mécanique céleste classique, comme le fera aussi Hubble. La correspondance de Vesto Slipher conservée à l'observatoire Lowell montre que les relations épistolaires avec ces théoriciens sont tardives : 1921 avec Eddington, mais 1925 pour Lemaître, 1928 pour de Sitter et 1931 avec Einstein. Aucune correspondance entre Slipher et Lemaître n'a été retrouvée dans les archives de Lemaître<sup>5</sup>.

Par contre de Sitter connaissait les travaux de Slipher sur les vitesses radiales des spirales dès 1917 (4). Il ne cite pas nommément Slipher mais écrit : « *Les nébuleuses spirales sont probablement les objets les plus distants que nous connaissons. Récemment un certain nombre de vitesses de ces nébuleuses ont été déterminées. Les observations sont encore incertaines...* » Néanmoins Slipher les utilise comme argument en faveur de la théorie de la gravitation revue par Einstein et lui-même. De Sitter élabore une théorie personnelle de l'Univers qui s'oppose à celle de Einstein. Elle prévoit que les objets lointains doivent avoir des vitesses radiales très élevées (Univers en expansion). Les mesures de Slipher et de ses collègues, décrites plus haut, viennent conforter cette hypothèse basée sur la théorie de la Relativité et infirmer celle d'Einstein. Mais pour cela il faudrait, dit-il, que la majorité des spectres des nébuleuses montrent un décalage vers le rouge ce que les observations ultérieures confirmeront très vite avec la progression des travaux de Vesto Slipher.

En 1931, Arthur Eddington (1882-1944) cite la récession des nébuleuses spirales, découverte par Slipher, en introduction de son article sur la récession des nébuleuses extragalactiques (5) : « *Un mouvement systématique de récession des nébuleuses spirales a été trouvé par V.M. Slipher dans sa détermination des vitesses radiales.* ». Mais le concept d'expansion a été en réalité démontré par l'abbé Georges Lemaître, un temps élève de Eddington, dans un article de 1927 (11) resté peu connu, sauf par Eddington qui le traduira et fera connaître les idées de Lemaître. Ce dernier fait référence à Vesto Slipher dans un article postérieur de 1931 mais pas dans celui de 1927. Cependant il cite à propos des vitesses radiales un article de

---

<sup>5</sup> Nous remercions l'équipe des Archives Lemaître, Université Catholique de Louvain, Institut d'Astronomie et géophysique G. Lemaître. Louvain-la-Neuve. Belgique.



Strömberg (21;22) qui, lui, fait largement référence aux travaux de Slipher à qui il a d'ailleurs demandé l'autorisation d'utiliser ses données. Par ailleurs, il est probable que Lemaître a eu connaissance des travaux de Slipher dès 1925, lors de son séjour au Massachusetts Institute of Technology où il avait accès à toutes les publications américaines.



Copyright : Flagstaff Observatory

En 1947, Vesto Slipher l'astronome confirmé.

Les travaux de Vesto Slipher ont donc été reçus favorablement et très rapidement par les physiciens cosmologistes, en particulier de Sitter et Lemaître qui ont compris que ces vitesses radiales élevées apportaient des éléments en faveur d'une hypothèse qu'ils privilégiaient, celle d'un univers en expansion et cela, avant même les travaux déterminants de Edwin Hubble (1925).

### **Contestation du paradigme d'univers**

Dans le cadre de la théorie des révolutions scientifiques de Thomas Kuhn (10) la découverte de Slipher apparaît comme une observation qui questionne la science normale en cours sur l'Univers. Ce paradigme, issu des travaux de William Herschel (1738-1822) et accepté par les plus grands astronomes comme Arago (1786-1853) en France, considère l'Univers comme l'ensemble de tous les objets visibles à l'œil nu et au télescope (1). Tous les objets, du système solaire aux nébuleuses en passant par les étoiles forment un ensemble unique. On n'en mesure pas la limite réelle et d'ailleurs, William Herschel imagine qu'avec des télescopes plus puissants la limite de

l'Univers visible sera repoussée. À l'époque de Vesto Slipher, toutes les observations scientifiques sont en faveur de ce modèle d'Univers que ce soit celles des étoiles, des nébuleuses gazeuses ou des amas stellaires. Seule l'observation des nébuleuses spirales met en question ce paradigme. Pour Kuhn, la découverte de nouveaux faits précède « *les inventions ou nouveautés de la théorie* ». C'est bien ce que fait Slipher en cherchant des paramètres qui caractérisent les nébuleuses spirales par rapport aux autres objets astronomiques. Leur forme spirale, leur spectre de type stellaire, l'apparition d'une nova au sein de la nébuleuse d'Andromède et les grandes vitesses radiales sont autant d'anomalies susceptibles de créer une crise au sein du paradigme. Mais c'est la comparaison des déplacements du système solaire par rapport au système stellaire puis de ce système dans son ensemble par rapport aux nébuleuses spirales qui semble porter le coup le plus dur au concept d'univers limité à la Voie Lactée (ou Galaxie). C'est en effet un argument fort en faveur d'un déplacement relatif des nébuleuses et du système stellaire et donc d'une identité propre pour les nébuleuses spirales. Pourquoi pas des univers-îles ? Cependant les défenseurs de la science normale résistent, en particulier en soutenant que les mesures sont entachées d'erreurs, trop imprécises. Harlow Shapley (1885-1972), qui s'intéresse à la dimension de la Voie Lactée, oppose d'autres mesures à celles de Slipher. Le diamètre de la Galaxie qu'il établit semble si grand (300 000 années de lumière) qu'il paraît impossible que les nébuleuses spirales n'y soient pas totalement contenues. Il faudra attendre les mesures par Edwin Hubble portant sur la distance de la nébuleuse d'Andromède pour vaincre les dernières résistances du paradigme ancien. Sur le plan théorique, De Sitter qui utilise les mesures de Vesto Slipher et la Relativité Générale construit une nouvelle théorie et « invente » un nouvel univers que les travaux de Lemaître et de Friedmann viendront conforter.

Il ne restera plus à Hubble qu'à associer vers 1930 ces mesures de distances des spirales avec leur vitesse radiale pour confirmer, par des données d'observation, les calculs théoriques de Einstein, de Sitter et Friedmann.

Ce sont donc bien des mesures qui, dans ce domaine, sont à l'origine du profond changement conceptuel de notre Univers. Ces mesures sont rendues possibles par le développement d'un nouvel outil : la spectroscopie et le développement de nouveaux télescopes. Nulle expérience ne peut en effet s'appliquer à l'Univers et ce sont donc les observations qui produisent les données. Or la précision des données dépend en astronomie des

moyens d'observations. Suffisants pour les planètes et les étoiles, les télescopes et les spectrographes ont dû s'améliorer pour que ces données soient acceptées par la communauté des astronomes. Cependant ce qui frappe dans l'épisode des vitesses radiales des spirales c'est qu'un groupe d'astronomes était prêt à accepter puis à tirer des conclusions de données tellement imprécises que jamais les astrométristes ne les auraient acceptées. C'est donc que les esprits étaient préparés à remettre en cause le paradigme en cours et qu'une hypothèse était prête à succéder à celle de l'Univers limité à la Galaxie, celle des Univers-îles développée par Kant (8) en 1755.

## Conclusions

Vesto Slipher apporte une connaissance nouvelle fondamentale : les nébuleuses spirales ont des vitesses radiales très élevées. La plupart d'entre elles s'éloignent de nous et cela serait en faveur d'une dispersion de ces objets dans l'Univers, bien que la tendance des spirales à se grouper en amas semble contredire cette hypothèse. L'existence de spirales qui se rapprochent de nous est interprétée comme un déplacement possible de notre propre Galaxie par rapport aux spirales. Enfin, notre système solaire se déplace en masse dans une direction bien déterminée dans la Galaxie qui, elle-même se déplacerait dans une direction précise par rapport aux nébuleuses spirales. Les spirales sont en rotation et ce point sera à l'origine de travaux ultérieurs et de controverse.

Sur le plan de la mesure, la controverse est due à la précision atteinte par les astronomes classiques spécialistes de la mécanique céleste, précision à laquelle n'arrivent pas les « nouveaux » astrophysiciens avec la spectrographie. Ceux-ci se défendent en comparant la précision de leurs mesures sur les nébuleuses avec celle portant sur les vitesses radiales des étoiles qu'ils jugent équivalente. Ils considèrent également que l'échelle des mouvements qu'ils mesurent est telle que l'erreur de mesure ne remet pas en cause leurs conclusions. Cependant ils cherchent à améliorer en permanence cette précision et y parviennent progressivement.

La découverte de Slipher et ses conséquences prennent bien leurs places dans le concept de « révolution scientifique » de Thomas Kuhn. Elle fait en effet partie des observations qui viennent mettre en défaut certaines conséquences du paradigme représenté par un univers tout entier contenu dans la Voie Lactée. D'autres attaques viendront et après 1925 un nouveau paradigme verra

le jour. Parallèlement les cosmologistes utilisent les découvertes de Slipher à l'appui de leurs théories de l'expansion de l'Univers.

## Références

1. Arago F: Leçons d'astronomie. Paris Just Rouvier et E. Bouvier, 1836
2. Campbell WW and Paddock GF: The Spectrum and Radial Velocity of the Spiral Nebula N. G. C. 4151. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 1918, 30: 68
3. Clerke AM: Problems in astrophysics. London 1903
4. de Sitter W: On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Third paper. Mon Not Roy Astron Soc 1917, 78: 3-28
5. Eddington A.S.: The recession of the extra-galactic nebulae. Mon Not Roy Astron Soc 1931, 92: 3-7
6. Huggins W: On the Proper Motions of the Nebulae. Astronomical register 1873, 11: 269-271
7. Huggins W: Further observations on the spectra of some of the stars and nebulae, with attempts to determine therefore whether these bodies are moving toward or from Earth, also observations on the spectra of the sun and of comet II. Phil Trans R Soc 1868, 158: 529-564
8. Kant E: Histoire générale de la Nature et théorie du ciel. Paris Vrin, 1984
9. Keeler JE: Photographs of nebulae and clusters made with the Crossley reflector. Publications of Lick Observatory 1908, 8: 1
10. Kuhn T: La structure des révolutions scientifiques. Paris Flammarion, 1983
11. Lemaître G: Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. Ann Soc Scient de Bruxelles 1927, 47: 49-59
12. Paddock GF: The relation of the system of stars to the spiral nebulae. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 1916, 38: 109-115
13. Pease FG: The Radial Velocity of the Nebula N. G. C. 1068. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 1915, 27: 133-134
14. Pease FG: The rotation and radial velocity of the spiral nebula N. G. C. 4594. Popular Astronomy 1917, 25: 26-27
15. Reynolds JH: Motion in the spiral nebulae M 101 and NGC 4594. The Observatory 1917, 40: 131-132
16. Slipher VM: Nebulae. Proceedings of the American Philosophical Society 1917, 56: 403-409
17. Slipher VM: Radial velocity observations of spiral nebulae 1995. The Observatory 1917, 40: 304-306
18. Slipher VM: The spectrum and velocity of the nebula N.G.C. 1068 ( M 77). Lowell Observatory Bulletin 1917, 3: 59-63
19. Slipher VM: The radial velocity of the Andromeda Nebula. Lowell Observatory Bulletin 1913, 2: 56-57
20. Slipher VM: Spectrographic Observations of Nebulae. Popular Astronomy 1915, 23: 21-24
21. Strömberg and G.: Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae. Astrophysical Journal 1925, 61: 353-362
22. Stromberg G: No. 292. Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae. Contributions from the Mount Wilson Observatory / Carnegie Institution of Washington 1925, 292: 1-10
23. Young RK and Harper WE: The Solar Motion as Determined from the Radial Velocities of Spiral Nebulae. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada 1916, 10: 134

## Le côté obscur de l'Univers

Alexandre Arbey, Observatoire de Lyon

**Résumé :** *Matière noire et énergie noire représentent actuellement la quasi-totalité de l'énergie contenue dans l'Univers et nos connaissances à leur sujet sont très réduites. Aussi, la compréhension et la détection de la matière noire et de l'énergie noire constituent actuellement deux enjeux majeurs de la cosmologie.*

### Un peu d'histoire...

La question de l'existence de la matière noire est un problème relativement ancien, puisqu'elle a été évoquée pour la première fois en 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky. En effet, il étudiait à cette époque un groupe de sept galaxies de l'amas de Coma, et souhaitait comparer la « masse lumineuse » de l'amas, qu'il pouvait déduire de la quantité de lumière émise par cet amas, à la « masse dynamique » de l'amas, calculable à l'aide de la dynamique observée des composantes de l'amas et des lois de Newton. Ce faisant, il remarqua que la masse dynamique apparaissait comme quatre cents fois plus grande que la masse lumineuse. La question de cette différence de masse a été soulevée à nouveau seulement une quarantaine d'années plus tard, dans les années 1970. L'astronome américaine Vera Rubin étudia la rotation des galaxies spirales, et pu ainsi en déduire la masse dynamique, qui apparaissait là aussi beaucoup plus grande que la masse lumineuse. C'est à partir de ce moment-là que l'on nomme cette matière non-lumineuse et indétectable « matière noire » ou encore « matière sombre ». Les études qui ont suivi ont confirmé la présence du problème de la matière noire dans les galaxies et dans les amas.

Le problème de l'énergie noire est à la fois une question théorique discutée peu de temps après l'apparition de la relativité générale, et un problème nouveau. Dans les années 1920, pour des raisons philosophiques, Albert Einstein pensait que l'Univers devait être statique. Or, les équations de la relativité générale semblaient indiquer que l'Univers devait être en expansion. Einstein proposa alors d'introduire un nouveau terme dans ses équations, basé sur une nouvelle constante gravitationnelle, la constante cosmologique.

Quelques années plus tard, Edwin Hubble a pu montrer en 1929 en étudiant la vitesse d'éloignement de galaxies lointaines que l'Univers n'est pas statique, mais en expansion. C'est ainsi que l'idée d'une constante cosmologique a été abandonnée pendant longtemps. Cependant, dans les années 1990, des mesures très précises de supernovæ distantes et du fond de rayonnement cosmologique ont montré que le taux d'expansion de l'Univers ne peut pas être expliqué sans la présence d'une « énergie noire » (ou « énergie sombre ») accélérant l'expansion de l'Univers, et la constante cosmologique proposée initialement par Einstein peut alors apparaître comme un modèle possible d'énergie noire.

### Équivalence Matière-Énergie

La Relativité Restreinte proposée par Albert Einstein en 1905 nous indique qu'il n'existe pas de distinction entre matière et énergie. En effet, la matière peut apparaître comme une sorte de cristallisation de l'énergie, alors que la lumière en serait une autre forme. La formule très connue  $E=mc^2$  indique clairement que la masse est proportionnelle à l'énergie. La physique des particules est basée sur ce principe, et les expériences ont clairement montré que des particules de matière (fermions) telles que des protons ou des électrons peuvent être converties en particules intermédiaires (bosons) telles que des photons.

### Mise en évidence

De nombreuses observations permettent d'étayer la thèse de la présence de matière noire et d'énergie noire, et concernent les objets astronomiques de grandes tailles.

## Les galaxies

C'est à cette échelle que les observations sont les plus probantes. En effet, il semble que la plupart des galaxies ont une masse dynamique qui serait près de dix fois plus grande que la masse visible.

Intéressons-nous au cas simple des galaxies spirales. Si l'on observe une étoile tournant autour du centre galactique, en utilisant les lois de Newton, on peut montrer que sa vitesse orbitale est proportionnelle à la racine carrée de la masse contenue à l'intérieur de l'orbite  $M$ , et inversement proportionnelle à la distance au centre  $R$  :

$$v_{orb} = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

L'avantage des galaxies spirales est que la mesure de vitesses de rotation en fonction du rayon de la trajectoire des étoiles en rotation autour du centre galactique est relativement aisée.

Si l'on observe la rotation d'une étoile autour du centre galactique et qu'on peut en mesurer la vitesse, il est possible d'inverser la relation précédente pour déterminer la masse contenue à l'intérieur de la trajectoire :

$$M(R) = \frac{R v_{orb}^2}{G}$$

Si l'on s'intéresse à la rotation des étoiles les plus éloignées du centre galactique, les mesures semblent indiquer que leurs vitesses restent constantes au-delà d'un certain rayon, et on parle alors de « courbes de rotation plates ». En utilisant la formule précédente, on peut donc en déduire que la masse dynamique augmente avec le rayon. Concernant la matière visible, on s'attend au contraire, que la masse lumineuse reste pratiquement constante au-delà d'un certain rayon, que l'on appellera rayon lumineux, qui correspond en pratique à la limite extrême de la galaxie telle qu'elle nous apparaît visuellement. C'est cette différence de comportement qui confirme l'existence de « matière noire » même à longue distance du centre galactique. On pourra se reporter à la figure 1 pour avoir une autre vision de la différence entre matière visible et matière dynamique en fonction des vitesses de rotation. On estime que cette matière noire pourrait s'étendre jusqu'à une centaine de kiloparsecs dans un halo sphérique qui entourerait les galaxies, tandis que le disque de matière visible s'étend au plus jusqu'à quelques dizaines de kiloparsecs.

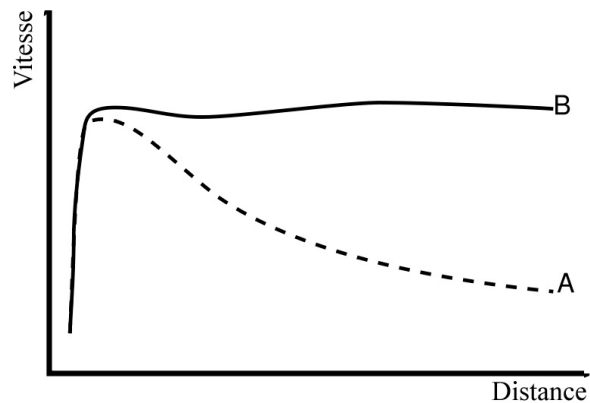


Figure 1 : Courbe de rotation typique pour une galaxie spirale. La courbe en trait plein correspond à des vitesses observées, tandis que la courbe en trait pointillé est la courbe qui devrait être observée si seule la matière visible était présente. (wikipedia)

## Les amas galactiques<sup>1</sup>

Les amas galactiques sont des groupements de galaxies en interaction gravitationnelle. Les études de ces amas galactiques ont montré qu'ils recèlent aussi une quantité importante de matière noire. Deux méthodes différentes ont permis de confirmer ce résultat.

La première méthode est encore une méthode dynamique. Les amas sont en effet composés de galaxies, mais aussi d'une quantité importante de gaz intergalactique. Sous l'influence de l'interaction gravitationnelle avec les galaxies proches, ce gaz va être fortement échauffé, et va émettre un rayonnement X important et détectable (voir figure 2). La masse visible de l'amas va donc contenir la masse des galaxies ainsi que la masse du gaz. L'étude du rayonnement X va permettre de connaître la température du gaz qui l'a émis, et cette température est en rapport avec l'interaction gravitationnelle qui s'exerce sur le gaz. Comme l'interaction gravitationnelle est provoquée par la masse, il va ainsi être finalement possible de trouver la masse totale de l'amas. En comparant cette masse totale à la masse visible de l'amas estimée à l'aide de méthodes observationnelles plus directes, cette méthode a révélé que seule 10 % de la masse totale serait visible. Le principal défaut de cette méthode est qu'elle reste très liée aux paramètres de modélisation de l'amas et du gaz chaud.

<sup>1</sup> NdIR : On appelle parfois "amas galactiques" les amas constitués d'étoiles et appartenant à notre Galaxie. Ici, le terme "amas galactiques" est employé dans le sens "amas de galaxies".



Figure 2 : Amas galactique lointain RDCS 1252.9-2927 vu par le satellite CHANDRA. Les globules violets correspondent au rayonnement X et permettent de voir l'emplacement du gaz chaud. (NASA/Chandra)

Une seconde méthode a donc été développée, et a l'avantage de ne pas souffrir des défauts de la première. Il s'agit d'une méthode basée sur les « effets de lentille gravitationnelle », qui sont des conséquences de la relativité générale. La relativité générale nous apprend que la présence de masse courbe la trajectoire de la lumière. La courbure peut se faire de la manière décrite sur la figure 3. Il est possible d'observer sur Terre une galaxie située derrière un amas galactique, car l'amas ayant une masse très importante va fortement courber les rayons lumineux provenant de la galaxie, qui vont donc pouvoir contourner l'amas. Cependant, la forme apparente de la galaxie va être modifiée, mais en analysant statistiquement cette forme apparente, c'est-à-dire en comparant cette forme apparente à celles de galaxies standards, il va être possible de reconstituer le trajet de la lumière, et en particulier son rayon de courbure. À partir des équations d'Einstein, il sera ensuite possible de déterminer la masse qui a provoqué cette courbure de la trajectoire lumineuse. Ainsi, cette méthode permet de déterminer la masse dynamique des amas avec un nombre relativement réduit de paramètres, et ainsi de confirmer les résultats de l'étude du rayonnement X du gaz chaud.

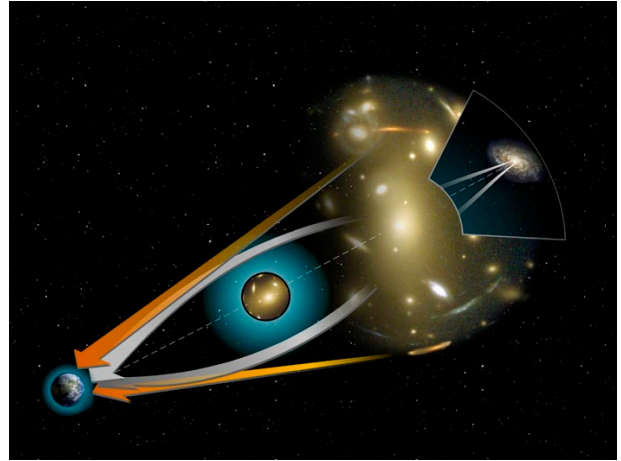


Figure 3 : L'amas galactique (au centre de l'image) dévie par effet gravitationnel les rayons lumineux provenant de la galaxie située derrière lui, et la rend ainsi visible sur Terre. (wikipedia)

### Les supernovæ de type Ia

Les supernovæ sont des objets astronomiques très importants, car leur grande luminosité leur permet d'être visibles même à très grande distance. Lorsque ces distances sont extrêmement grandes, la lumière qui nous en arrive a subi l'expansion de l'Univers, ce qui se traduit par un rougissement de cette lumière, et une augmentation de la magnitude apparente de la supernova. Si l'on est capable de connaître aussi la luminosité de la supernova, on va pouvoir déduire, de la comparaison entre magnitude apparente et magnitude absolue, une « distance de luminosité ». Or, les modèles cosmologiques théoriques permettent de calculer cette distance de luminosité à partir de la quantité de matière noire et d'énergie noire dans l'Univers, en fonction du décalage vers le rouge de la lumière. Si le décalage vers le rouge est facilement mesurable, il n'en est pas de même pour la luminosité. Heureusement, les supernovæ « de type Ia », provenant de l'explosion d'une naine blanche ayant atteint la masse de Chandrasekhar par accréation de la masse d'une étoile compagne, forment une classe relativement homogène, et en première approximation, ces supernovæ peuvent être considérées comme des « chandelles standards », c'est-à-dire comme une luminosité quasiment identique pour toutes ces supernovæ. De cette manière, on peut obtenir les informations nécessaires pour pouvoir utiliser les prédictions théoriques. Ainsi, les données actuelles montrent que l'Univers doit contenir environ 70 % d'énergie noire, le reste étant de la matière ou du rayonnement, et que l'expansion de l'Univers n'est pas en train de ralentir.

## Autres observations cosmologiques

D'autres études cosmologiques permettent de confirmer les résultats précédents.

On notera en particulier que le fond diffus cosmologique apporte de nombreuses informations sur le contenu énergétique de l'Univers. En pratique, le fond diffus cosmologique est le nom que l'on donne à l'ensemble de la lumière qui a été émise lorsque les premiers atomes se sont formés. Il s'agit donc d'une lumière qui a traversé l'Univers durant des milliards d'années avant de nous parvenir, et pour cette raison on la nomme parfois « rayonnement fossile ». Ce rayonnement provient de toutes les directions, et nous apporte en quelque sorte une image de l'Univers tel qu'il était au moment de cette formation d'atomes. Son étude nous a appris que le fond de rayonnement est très homogène et correspond à une température de 3 K. Il a été mis en évidence par hasard en 1964 par les radioastronomes Penzias et Wilson. Les études qui ont suivi cette découverte ont permis de mettre en évidence de petites fluctuations dans ce rayonnement (voir figure 4).

La répartition, la forme et la taille des fluctuations peuvent être modélisées, et les quantités de matière et d'énergie noires en sont des paramètres importants. Aussi, la comparaison entre les fonds diffus simulés et le fond diffus observé a pu permettre d'imposer des contraintes importantes sur les paramètres cosmologiques et de confirmer les observations précédentes. En particulier, ces études ont montré que l'Univers est globalement plat, et que l'énergie noire représente près de 70 % de l'énergie totale dans l'Univers, les atomes moins de 5 %, et la matière exotique (c'est-à-dire non composée d'atomes), près de 25 %.

Une autre manière de confirmer ces résultats est de considérer la répartition des grandes structures dans l'Univers, c'est-à-dire des galaxies et des amas de galaxies.

Là encore, des cartes de la répartition des structures dans l'Univers peuvent être établies, et comparées à des cartes virtuelles provenant de simulations cosmologiques modélisant la formation des structures en fonction de différents paramètres. Les contraintes obtenues à partir de ce genre de simulations permettent tout à fait de confirmer les résultats précédents.

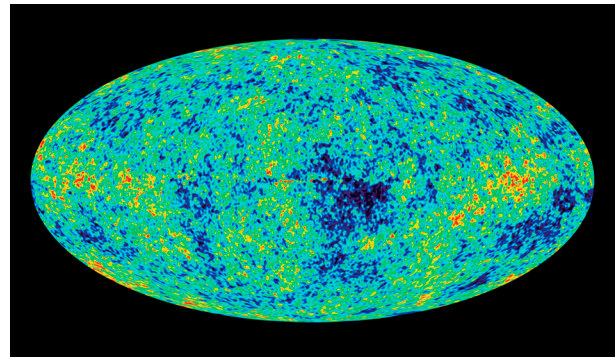


Figure 4 : Fluctuations dans le fond diffus cosmologique telles qu'observées par le satellite WMAP. (NASA/WMAP)

## La nature de la matière noire et de l'énergie noire

Même si aucune détection directe de la matière ou de l'énergie noires n'a pour le moment abouti, les études ont néanmoins permis d'obtenir des connaissances sur le comportement de ces composantes sombres, et des modèles possibles ont émergé.

### Description

La matière noire tout d'abord a comme caractéristique principale de réagir comme de la matière, c'est-à-dire d'avoir une pression faible et un comportement gravitationnel dominé par sa masse, tout en étant en très faible interaction avec le milieu environnant (sans quoi cette matière noire aurait déjà pu être mise en évidence). Des études cosmologiques détaillées ont permis cependant de faire la distinction entre matière noire « normale », composée de baryons (et en particulier d'atomes) et dont les gaz sont soumis aux lois de l'hydrodynamique, et matière noire « exotique » composée de particules non-baryoniques. Cette matière noire exotique représenterait la majorité de la matière noire dans l'Univers.

L'énergie noire apparaît comme une composante beaucoup plus exotique. En effet, la pression de cette énergie serait aujourd'hui extrêmement élevée, et sa caractéristique principale est d'être négative, et de n'avoir un effet qu'à des échelles extrêmement grandes. Alors que la matière noire tend à obliger l'Univers à se contracter sous l'effet de la gravitation, la pression négative de l'énergie noire va l'obliger à s'agrandir en accélérant. Cet effet qui peut paraître très étrange rappelle cependant le comportement du « vide » de la physique des

particules, et c'est pour cette raison que l'on peut aussi l'appeler « énergie du vide ».

### Noires ?

L'adjectif « noir » que l'on associe à matière noire ou énergie noire n'est bien entendu pas en rapport avec une couleur effective de ces composants. C'est en pratique un abus de langage, car il serait préférable de les qualifier d'invisibles ou encore indétectables. La caractéristique principale de ces composantes est d'interagir très faiblement avec les particules ordinaires, et en tant que tel, de ne réfléchir ou de ne produire aucune lumière.

### Modélisations

Différents modèles théoriques essaient d'expliquer la nature de la matière noire et de l'énergie noire.

Concernant la matière noire baryonique, c'est-à-dire composée d'atomes, des études ont montré que des gaz très froids ou des objets peu lumineux tels que des naines brunes ou des trous noirs peuvent être extrêmement difficiles à détecter, et ainsi être d'importants constituants de la matière noire baryonique, et on pense n'être actuellement capable que de mettre en évidence 10 % de cette matière noire baryonique.

Le plus gros problème est de comprendre de quoi peut être composée la matière noire non-baryonique. En effet, les simulations cosmologiques montrent que les neutrinos, que nous savons désormais massifs, peuvent au plus constituer 15 % de la matière noire non-baryonique, et le modèle standard de la physique des particules ne propose pas d'autre particule correspondant à cette matière noire non-baryonique. L'explication la plus d'actualité est de considérer que la matière noire non-baryonique est constituée de particules exotiques qui n'ont encore jamais été découvertes, et certains modèles de physique des particules tels que la supersymétrie ou le modèle des axions en proposent l'existence. La prochaine mise en marche du collisionneur LHC (Large Hadron Collider) au CERN pourrait apporter une réponse dans les années à venir.

Concernant l'énergie noire, le problème est plus complexe. Einstein avait proposé dans le passé l'existence d'une constante cosmologique qui pourrait éventuellement modifier la dynamique de l'Univers. Son idée a été plus récemment réutilisée dans un contexte différent : les comportements observés de l'énergie noire pourraient être expliqués

en ajoutant simplement une nouvelle constante à la physique connue, la constante cosmologique. Cependant, des problèmes théoriques sont apparus depuis lors, et cette explication n'est plus aussi convaincante. Une réponse théorique serait que l'énergie noire pourrait être une manifestation de l'énergie du vide de la physique des particules, mais les calculs révèlent que cette énergie du vide de la physique des particules est d'un ordre de grandeur très différent de l'énergie noire cosmologique, et ne peut donc pas l'expliquer. À cause de cela, l'énergie noire reste très mystérieuse et énigmatique.

D'autres modèles sont aussi apparus, avec des conceptions fondamentalement différentes. L'idée de base de ces modèles est que notre manière d'effectuer nos calculs peut être fautive (en particulier pour l'énergie du vide de la physique des particules), ou que nos équations de départ sont fausses. Ainsi, les problèmes de la matière et de l'énergie noires pourraient être en réalité de faux problèmes. Cette idée est étayée par le fait que nous n'avons encore pas pu comprendre comment lier et réconcilier l'interaction gravitationnelle avec les effets quantiques. En particulier, les théories des cordes ont pour but d'unifier des différentes interactions de la Nature dans une théorie unique, et pourraient éventuellement expliquer la nature de l'énergie noire. D'autres modèles, tels que MOND (MODified Newtonian Dynamics) ou les théories tenseur-scalaire, proposent de modifier les équations d'Einstein de la relativité générale, de manière à ce que les lois de gravitation aux grandes échelles, c'est-à-dire à l'échelle des galaxies ou plus, soient différentes et puissent expliquer le comportement dynamique observé à ces échelles.

### Conclusion

Matière noire et énergie noire représentent deux des problèmes les plus importants de la cosmologie actuelle. Si étudiées, elles restent pourtant deux questions énigmatiques, mais nous pouvons espérer dans les années à venir qu'il sera possible de mieux les comprendre et éventuellement de les détecter de manière plus directe.

■

## Le puits et le pendule

Pierre Lerich

**Résumé :** *L'idée de creuser un puits à travers la Terre remonte aussi loin que le Moyen-Âge (14<sup>e</sup> siècle). Contrairement au rêve de voler dans les airs, l'idée du puits n'a jamais reçu le moindre début d'application mais elle est restée un sujet de réflexion et un thème d'exercice sur les équations différentielles.*

Au départ, l'idée résultait logiquement de la forme sphérique de la Terre, admise dès l'Antiquité. C'était une tentation d'aller aux antipodes par le plus court chemin : ce puits aurait constitué un raccourci et une grande économie, du moins en principe. Une fois l'idée du puits envisagée, l'idée de faire tomber dedans un boulet de canon s'imposait aussi naturellement. À l'époque de Galilée, on admettait que le boulet tomberait jusqu'au centre de la Terre, puis, poursuivant sur son élan, monterait jusqu'aux antipodes, puis reviendrait à son point de départ. Galilée avait justement réalisé diverses expériences sur des plans inclinés d'où il ressortait que la vitesse acquise pendant la descente permettait de remonter exactement à la hauteur initiale, comme un pendule. Ce boulet dans le puits était donc une sorte de pendule.

Galilée a repris ce thème sans le développer, mais dans une intention particulière. La division admise depuis Aristote entre mouvements naturels (chute libre) et mouvements violents (objet lancé verticalement), bien loin d'être une division fondamentale et universelle, n'était pour Galilée qu'une illusion. En effet, le boulet de canon tombe dans le puits (mouvement naturel) puis remonte de l'autre côté (mouvement violent). Ces deux mouvements sont aussi naturels l'un que l'autre puisque le second s'explique entièrement par le premier. Il n'y a donc qu'un mouvement, d'abord accéléré, puis décéléré. Le puits et le pendule n'apparaissent donc chez Galilée que dans une intention polémique. Il n'a pas essayé de calculer la période de ce mouvement : en combien de temps le boulet de canon reviendrait-il à son point de départ ?

Newton n'a jamais parlé de puits ni de boulet de canon, mais il a apporté tous les éléments de réponse au problème. La première question qui se

pose est : quelle est la force de la gravitation à l'intérieur de la Terre ? Newton démontre que celle-ci est directement proportionnelle à la distance au centre de la Terre. Le « voyageur » arrivé à mi-distance entre la surface et le centre ne pèse plus que la moitié de son poids habituel. Au centre, il ne pèse plus rien. Jules Verne n'a pas du tout pensé à cela dans son décevant *Voyage au centre de la Terre*. Deuxième question : Quelle sera la trajectoire d'un corps attiré par un point proportionnellement à la distance (attraction plus forte à grande distance) ? Réponse de Newton : une ellipse, mais différente de l'ellipse de Kepler : ici, le point attracteur occupe le centre de l'ellipse et non son foyer. Cette ellipse est donc symétrique par rapport au point attracteur. Elle peut éventuellement dégénérer en un cercle si ses deux axes deviennent égaux, et en une ligne droite si le petit axe diminue jusqu'à disparaître. Le plus étonnant est que toutes ces ellipses, grandes ou petites, larges ou allongées, sont décrites dans le même temps périodique. Cela heurte nos habitudes de pensée, mais il n'y a pas lieu de s'étonner : il s'agit d'une loi de gravitation qui n'existe pas dans notre univers, sinon d'une façon tout à fait théorique, à l'intérieur de la Terre, en supposant qu'elle soit homogène et qu'un corps puisse s'y déplacer librement, sans rencontrer de résistance.

La démonstration de ce fait essentiel est particulièrement admirable. Elle consiste en quelques phrases, sans aucun calcul et sans même une figure. Son importance vient de ce qu'elle permet de calculer les inconnues du problème (position, vitesse, période) sans utiliser le calcul différentiel, qui n'existe pas encore.

Pour cela, il faut faire appel à un troisième passage des *Principia*. Avec un cercle auxiliaire, un sinus et un cosinus, et en fixant les conditions initiales (rayon de la Terre et chemin parcouru



pendant la première seconde de chute), on trouve que le boulet de canon arriverait au centre de la Terre en 21 minutes et ferait sa réapparition à l'entrée du puits au bout d'une heure 24 minutes après avoir brièvement effleuré les antipodes. Sa vitesse maximale serait de 7 644 m/s.

Galilée avait aussi observé que la période des oscillations du pendule était indépendante de leur amplitude. Le pendule s'amortissait peu à peu, mais le temps d'une oscillation restait le même. Cette observation s'appliquait-elle au boulet de canon ? La démonstration de Newton permet de répondre oui sans hésiter (et sans faire de calcul). Si on lâchait le boulet à mi-chemin entre la surface et le centre, il reviendrait à son point de départ en 1 h 24 minutes, le même temps qu'en partant de la surface ; en revanche sa vitesse maximale au centre serait deux fois moindre.

Cette conclusion serait aussi valable si on creusait non pas un puits vertical, mais un tunnel rectiligne entre deux points de la Terre. On démontre facilement que 1 000 km dans un tel tunnel seraient parcourus dans le même temps que les mêmes 1 000 km au milieu du puits passant par le centre de la Terre. Il faudrait alors, remplacer le boulet par un véhicule adapté, muni de parfaits roulements à bille, et parfaitement aérodynamique. Par exemple, un tunnel Lille-Perpignan s'enfoncerait sous la Terre jusqu'à une profondeur de 15 km selon un angle de 4° environ au départ, soit une pente de 7 % produisant une accélération très supportable. Le voyage (aller simple) durerait 42 minutes (2 fois 21 minutes), toujours la même durée quelle que soit la distance, chaque augmentation de la distance étant automatiquement compensée par une augmentation de la pente, donc de la vitesse. On pourrait poursuivre l'analogie avec le pendule en disposant sur le sol une carte de France et en faisant osciller un pendule suspendu au plafond, d'abord entre Lille et Perpignan, puis entre Paris et Clermont-Ferrand. Ces deux « trajets » seront effectués dans le même temps.

L'analogie entre le boulet de canon dans son puits et le pendule au bout de son fil vient de ce que l'un comme l'autre sont attirés proportionnellement à la distance, soit du centre de la Terre pour l'un, soit de la verticale dans le cas du pendule.

Cependant cette analogie est approximative car le pendule décrit un arc de cercle qui n'est pas tout à fait égal à la distance du pendule à la verticale. Cette approximation est suffisante pour les petits angles (moins de 10° par exemple) et d'ailleurs elle est très employée en astronomie pour des calculs rapides.

Toutes ces rêveries sur des voyages gratuits et écologiques, durant toujours 42 minutes, se heurtent à une foule d'objections évidentes, d'ordre géologique et technologique, auxquelles il faut ajouter une objection de principe : dans tout cela on a oublié que la Terre tourne et que tout mouvement rectiligne est affecté d'une déviation latérale due à une force parasite dite « de Coriolis ». Même dans un puits large et parfaitement vertical, le boulet de canon heurterait la paroi du côté est, rebondirait vers le côté ouest, et cela de plus en plus brutalement dès les premières minutes.

Aujourd'hui ces problèmes donnent lieu à des exercices élémentaires de calcul différentiel. L'équation à résoudre s'appelle « l'équation du pendule » et sa solution est si classique qu'elle est souvent donnée sans démonstration. On trouve le puits et le boulet dans des ouvrages du genre « la Physique amusante » ou « récréations mathématiques ».

On les trouve dans la *Physique en questions* de J.M. Lévy-Leblond chez Vuibert (rééd. 1998). Ces ouvrages sont volontiers humoristiques tout en étant très sérieux et utiles. Cette manière de faire de la science était justement celle de Galilée, qui ne perdait jamais une occasion de proposer un exemple un peu surréaliste, par exemple faire cuire un œuf en le faisant tourner avec une fronde (exemples souvent donnés pour ridiculiser l'adversaire). Galilée n'a pas pu résoudre le problème du boulet dans le puits avec les moyens de son temps. Newton a créé tous les outils nécessaires, mais comme il ne riait jamais, il ne les a pas appliqués au boulet dans le puits : il aurait certainement rejeté avec dédain cette idée saugrenue, bien que dans un autre contexte, plus sérieux, il ait lui aussi fait appel à un puits imaginaire pour calculer avec succès l'aplatissement de la Terre. L'idéal serait d'associer l'humour de Galilée et le génie de Newton, mais c'est peut-être beaucoup demander.



## MOUVEMENT DES PROJECTILES DANS DES TRAJECTOIRES PROCHES DE LA VERTICALE

Blaise SIMON, Docteur ès sciences

**Résumé :** On sait que la rotation de la Terre sur elle-même est prouvée, entre autres expériences, par la déviation vers l'est de la chute des corps lâchés sans vitesse initiale. Dans cette note, nous montrons comment la rotation de la Terre se manifeste dans d'autres expériences de balistique (objets lancés verticalement vers le haut, objets rebondissant après une chute libre).

### Introduction

À l'époque où la rotation de la Terre sur elle-même n'était pas encore bien admise par le public (disons au dix-septième siècle), les astronomes qui en cherchaient une preuve expérimentale pensaient en tenir une dans le mouvement des projectiles <sup>(1), (2)</sup>. En effet on imagine bien que, sur une Terre tournante, la portée d'un canon tirant vers l'est n'est pas la même que s'il tire vers l'ouest. Quant à calculer cette différence de portée, ce n'était pas commode, l'analyse mathématique n'étant pas aussi efficace que maintenant. D'autre part, vérifier cette hypothèse par l'expérience, il ne fallait pas trop y compter, étant donné le caractère rudimentaire de l'artillerie de l'époque. Donc, preuve à chercher ailleurs. En particulier, pour les trajectoires verticales, on se posait deux questions :

### Si la Terre tourne, où retombe un boulet tiré verticalement ?

Il ne semble pas que l'expérience ait réellement été faite, mais on y pensait (figure 1).



**Figure 1 :** Si la Terre tourne, un boulet tiré à la verticale ne retombera probablement pas à son point de départ. On peut même imaginer qu'il ne retombe pas du tout (Descartes n'en aurait pas été autrement surpris).

### Si la Terre tourne, où tombe un objet lâché d'une grande hauteur ?

Ici, l'expérience est plus facile à faire, car il ne manque pas de monuments du haut desquels on peut facilement lâcher des billes ; on peut aussi travailler dans des puits de mines. La première expérience concluante fut faite en 1802 par Benzenberg à Hambourg, du haut d'une tour de 76m, montrant une déviation de la chute à l'est de la verticale. Reich, en 1831, confirma ces résultats par des expériences plus soigneuses. Des mathématiciens comme Laplace et Gauss s'intéressèrent au problème, et montrèrent en effet que dans l'hypothèse d'une Terre faisant un tour sur elle-même en 24 heures, le calcul de la chute d'un corps montrait une déviation vers l'est égale à celle qu'on observait. *La rotation de la Terre sur elle-même était donc prouvée.*

Dans la présente note, après un rappel des équations du mouvement, et la description classique de la chute libre, nous décrirons un certain nombre de trajectoires proches de la verticale, qu'on ne voit pas souvent décrites dans la littérature.

### Mouvement d'un objet soumis uniquement à l'attraction du globe terrestre en rotation

C'est le cas d'un projectile lancé dans le vide, et qui n'est plus soumis à l'action du système qui l'a propulsé. Quand on tient compte de la rotation de la Terre sur elle-même, l'accélération  $\vec{a}$  du mouvement par rapport à un repère fixe sur le sol terrestre n'est pas seulement  $\vec{g}$ , mais <sup>(3)</sup> :

$$\vec{a} = \vec{g} - 2(\vec{\Omega} \wedge \vec{v}) \quad (1)$$

$\vec{g}$  est l'accélération de la pesanteur au lieu où se trouve l'objet, résultant de l'attraction newtonienne du globe, et de l'accélération centrifuge due à sa rotation. Sa direction est la verticale locale, donnée par le fil à plomb; au niveau du sol, sa norme est d'environ  $9,81 \text{ ms}^{-2}$ .

$\vec{\Omega}$  est le vecteur représentant la rotation de la Terre par rapport à la voûte céleste; il est parallèle à l'axe des pôles, et sa norme, indépendante du lieu, est  $7,292 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ .

$\vec{v}$  est la vitesse de l'objet par rapport à des axes fixés au sol.

La quantité  $-2(\vec{\Omega} \wedge \vec{v})$  est l'accélération de Coriolis; à cette accélération correspond ce qu'on appelle la force de Coriolis,  $-2m(\vec{\Omega} \wedge \vec{v})$ ,  $m$  étant la masse de l'objet.

Dans les conditions usuelles, la vitesse  $v$  est d'environ un à dix mètres par seconde et l'accélération de Coriolis est bien plus faible que l'accélération de la pesanteur, de sorte qu'elle passe inaperçue. Mais dans certaines conditions (pendule de Foucault) elle peut être parfaitement observable.

La force de Coriolis ressemble à la force de Lorentz,  $\vec{F} = q(\vec{v} \wedge \vec{B})$ , qui agit sur une charge  $q$  en mouvement dans un champ magnétique  $\vec{B}$ . Dans un champ uniforme, la trajectoire est une hélice, tout le monde apprend ça au lycée. Nous en verrons un exemple voisin en étudiant la chute libre d'un objet.

## Équations générales du mouvement

Plaçons-nous dans l'hémisphère nord, en un lieu de latitude  $\lambda$ , et prenons les axes  $Ox$  vers le sud,  $Oy$  vers l'est,  $Oz$  suivant la verticale ascendante, ces axes portant les vecteurs unitaires  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  (figure 2).

Les composantes de  $\vec{\Omega}$  sont  $(-\Omega \cos \lambda, 0, \Omega \sin \lambda)$  celles de  $\vec{v}$  sont  $v_x, v_y, v_z$ , de sorte que l'accélération de Coriolis est le vecteur :

$$-2\vec{\Omega} \wedge \vec{v} = 2\Omega \sin \lambda \cdot v_y \vec{i} - (2\Omega \sin \lambda v_x + 2\Omega \cos \lambda v_z) \vec{j} + 2\Omega \cos \lambda v_y \vec{k} \quad (1)$$

L'équation (1) s'écrit donc, sachant que les composantes de  $\vec{g}$  sont  $(0, 0, -g)$

$$\begin{aligned} a_x &= 2\Omega \sin \lambda v_y \\ a_y &= -2\Omega \sin \lambda v_x - 2\Omega \cos \lambda v_z \\ a_z &= -g + 2\Omega \cos \lambda v_y \end{aligned} \quad (2)$$

Ce système d'équations ne peut pas être résolu rigoureusement. On ne peut le résoudre qu'en première approximation, comme nous allons le voir par un certain nombre d'exemples.

## Chute libre

Un objet est lâché sans vitesse initiale d'une altitude  $h$  (figure 2).

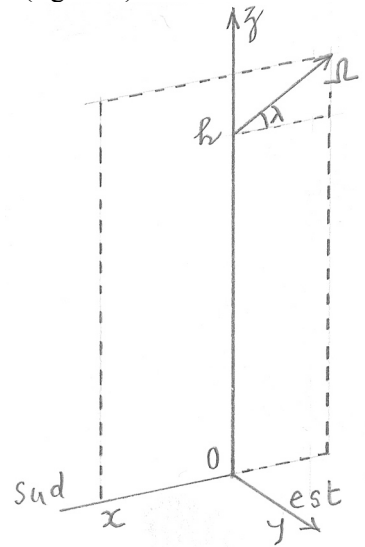


Figure 2

Au début, l'objet tombant à la verticale, c'est la composante horizontale de  $\vec{\Omega}$  qui compte dans l'accélération de Coriolis: l'accélération correspondante est parallèle à  $Oy$ : déviation vers l'est. Puis, dès que  $\vec{v}$  est dans le plan  $(Oy, Oz)$ , l'accélération de Coriolis a une composante  $v_y$ , non nulle, vers le sud. Donc la déviation a lieu vers le sud-est.

Quand le mouvement continue, l'accélération de Coriolis change de direction, accompagnant le changement de direction de  $\vec{v}$ : l'objet tombe donc en tourbillonnant.

En première approximation, le mouvement est une chute verticale d'accélération  $a_z = -g$  et de vitesse  $v_z = -gt$ : les composantes  $v_x$  et  $v_y$  sont négligeables devant  $v_z$ .

On a donc :

$$\begin{aligned} a_y &= 2\Omega \cos \lambda g t, \\ \text{d'où} \\ v_y &= \Omega \cos \lambda g t^2, \end{aligned}$$

relation qu'on porte dans l'équation donnant  $a_x$ . Enfin le second terme de  $a_z$  est négligeable devant  $g$ . Le système (2) prend donc une forme simple :

$$\begin{aligned} a_x &= \Omega^2 \sin 2\lambda g t^2 \\ a_y &= 2 \Omega \cos \lambda g t \\ a_z &= -g \end{aligned}$$

Par ces simplifications, on a transformé un système de trois équations, en un groupe de trois équations indépendantes. En intégrant deux fois on obtient :

$$\begin{aligned} x &= \Omega^2 \sin 2\lambda g t^4 / 12 \\ y &= \Omega \cos \lambda g t^3 / 3 \\ z &= h - (g/2)t^2 \end{aligned}$$

$x$  et  $y$  étant positifs, il y a une déviation vers le sud-est. De l'équation donnant  $z$  on tire :

$$t = (2d/g)^{1/2},$$

$d$  étant la distance parcourue ( $h - z$ ). Portons cette valeur dans les équations de  $x$  et de  $y$  :

$$\begin{aligned} x &= \Omega^2 \sin 2\lambda d^2 / (3g) \\ y &= 2^{3/2} \Omega \cos \lambda d^{3/2} / (3 g^{1/2}) \end{aligned} \quad (3)$$

Comparons à l'expérience. En 1831, Reich a fait des expériences de chute libre dans un puits de mine à Freyberg, en Allemagne ( $\lambda = 51^\circ$ ,  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ), la hauteur de chute étant de 158 m. Il a fait 106 expériences et a trouvé des déviations vers l'est comprises entre 2,69 cm et 2,87 cm ; pas de déviation observable vers le sud.

Pour cette expérience, le calcul donne

$$\begin{aligned} x &= 0,0000044 \text{ m}, \text{ absolument négligeable} \\ y &= 0,0274 \text{ m} \end{aligned}$$

Donc les résultats du calcul sont en bon accord avec l'observation.

Notons la petitesse de la déviation : même pas 3 cm pour 158 m de chute !

La figure 3 montre la chute dans le plan  $Oy, Oz$ , calculée dans les conditions suivantes  $\lambda = 49^\circ$ ,  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $h = 155 \text{ m}$ .

Pour une chute  $AO$  de 155 m, la déviation  $OB$  vers l'est est de 2,78 cm.

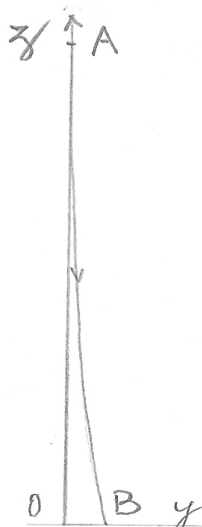


Figure 3

On voit par l'équation (3) que la déviation vers l'est est d'autant plus grande que l'accélération  $g$  est petite. On peut se placer dans de telles conditions à l'aide de la célèbre machine d'Atwood : c'est ce qu'a fait en 1912 le Père Hagen, directeur de l'observatoire du Vatican <sup>(4)</sup>. Grâce à cette amplification de la déviation, il a pu étudier des chutes de hauteur faibles (27 m seulement), qui ont en tous points confirmé le modèle théorique.

Notons aussi à ce sujet que le frottement de l'air ralentit la chute ; le calcul montre que dans ces conditions la déviation vers l'est est plus grande que dans le vide.

On pourrait même envisager des chutes de billes dans des liquides visqueux : la chute se faisant à vitesse constante (la vitesse limite), on se trouverait dans un cas similaire au mouvement des électrons dans un champ magnétique constant : trajectoire en spirale !

## Projectiles lancés verticalement

Nous avons vu que le déplacement dans la direction  $Ox$  est négligeable, nous n'en tenons donc pas compte ici.

Si la vitesse de lancement vers le haut est  $v_0$ , on a  $v_z = -g t + v_0$ . Portons ce  $v_z$  dans  $a_y$  du système (2), celui-ci s'écrit simplement

$$a_y = -2 \Omega \cos \lambda (v_0 - g t)$$

$$a_z = -g$$

ce qui donne :

$$\begin{aligned} y &= \Omega \cos \lambda g t^3 / 3 - \Omega \cos \lambda v_0 t^2 \\ z &= -1/2 g t^2 + v_0 t \end{aligned}$$

Lançons l'objet avec une vitesse  $v_0 = 55,146 \text{ m/s}$  pour qu'il atteigne une hauteur de 155 m. On obtient :

$$\begin{aligned} y &= 1,56 \cdot 10^{-4} t^3 - 0,00264 t^2 \\ z &= -4,905 t^2 + 55,146 t \end{aligned}$$

La trajectoire est représentée par la figure 4a.

Au sommet, à 155 m au dessus du sol, il n'y a pas de point de rebroussement. L'objet retombe, à 11,2 cm à l'ouest de son point de départ : la déviation  $OB'$  est quatre fois celle de la déviation de la chute libre pour une même hauteur  $h$ . La bille retombe au sol verticalement. Si alors elle rebondit sur le sol horizontal, et si le choc est élastique, elle décrira une nouvelle arche, et ainsi, de rebond en rebond, pourra se déplacer très notablement vers l'ouest. Elle fera le tour du parallèle terrestre en 13 ans 3 mois 14 jours.

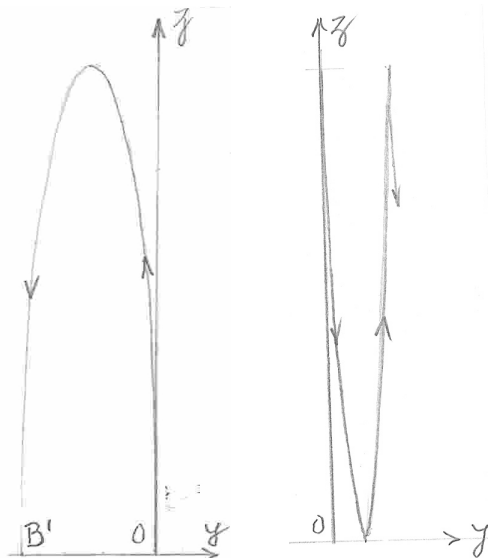


Figure 4 a

Figure 4 b

## Rebond après la chute libre

Reprenons l'expérience du paragraphe 3. Pour une hauteur de chute de 155 m, les composantes de la vitesse en arrivant au sol sont  $v'_y = 0,0148 \text{ m/s}$  et  $v'_z = -55,1461 \text{ m/s}$ . Si la bille rebondit élastiquement sur le sol sa vitesse au moment du rebond aura les composantes  $v_{0y} = 0,0148 \text{ m/s}$  et  $v_{0z} = 55,1461 \text{ m/s}$ .

En prenant l'origine au point de départ du rebond, nous avons en première approximation  $v_y = v_{0y}$  et  $v_z = -gt + v_{0z}$ . Portons ces deux relations dans  $a_y$  et  $a_z$  du système (2) et intégrons, nous obtenons :

$$y = \Omega \cos \lambda \frac{g}{3} t^3 - \Omega \cos \lambda v_{0z} t^2 + v_{0y} t$$

$$z = -\left(\frac{g}{2}\right) t^2 + v_{0z} t$$

soit, avec les valeurs numériques indiquées

$$y = 0,0001564 t^3 - 0,002636 t^2 + 0,148 t$$

$$z = -4,905 t^2 + 55,1461 t$$

La trajectoire est la courbe (b) de la figure 4. La montée est symétrique de la descente. Cette fois il y a au sommet de la trajectoire un point de rebroussement. Mêmes commentaires qu'au paragraphe précédent au sujet de rebonds éventuels.

## Comment lancer un objet pour qu'il retombe à son point de départ

C'est le problème du bilboquet. Soient  $v_{0x}$ ,  $v_{0y}$  et  $v_{0z}$  les composantes de la vitesse de tir initiale. En première approximation on a donc

$$v_x = v_{0x}, \quad v_y = v_{0y}, \quad v_z = -gt + v_{0z}$$

Portons ces expressions dans les trois équations du système (2) et intégrons, nous obtenons

$$x = \Omega \sin \lambda v_{0y} t^2 + v_{0x} t$$

$$y = \Omega \cos \lambda \frac{g}{3} t^3 - \Omega \cos \lambda v_{0z} t^2 + v_{0y} t$$

$$z = -1/2 g t^2 + v_{0z} t$$

Nous voulons que la hauteur atteinte soit de 155 m, on a donc  $v_{0z} = 55,1461 \text{ m/s}$ , et le temps total de vol est de 11,243 s. Portons ces deux valeurs dans la deuxième équation ci-dessus et faisons  $y = 0$ , cela nous donne  $v_{0y} = 0,009887 \text{ m/s}$ .

Portons cette valeur de  $v_{0y}$  dans la première équation ci-dessus, et faisons  $x = 0$ , nous obtenons  $v_{0x} = -6,117 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ; cette vitesse étant plus de mille fois plus petite que  $v_{0y}$ , nous pouvons négliger le mouvement suivant  $Ox$

On a ainsi :

$$y = 0,000156 t^3 - 0,00264 t^2 + 0,009887 t$$

$$z = -4,905 t^2 + 55,1461 t$$

La figure 5 représente cette trajectoire : pour que le projectile retombe à son point de départ, il faut tirer légèrement vers l'est (la vitesse de départ doit faire avec la verticale un angle de  $37^\circ$ ).

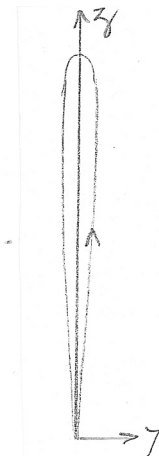


Figure 5

## Références

- (1) Acloque P. (1982) "Histoire des expériences pour la mise en évidence du mouvement de la Terre". Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, n° 4.
- (2) Gapaillard J. (1993) "Et pourtant, elle tourne. Le mouvement de la Terre". Seuil.
- (3) Bruhat G. (1940) Cours de Mécanique, Masson.
- (4) Hagen J. (1912) "How Atwood's machine shows the rotation of the earth even quantitatively". International congress of mathematicians, Cambridge, august 1912

■

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Les orbites de la Terre et de Mars la première loi de Kepler

Béatrice Sandré

**Résumé :** *Kepler admet le modèle héliocentrique de Copernic : les planètes et la Terre tournent autour du Soleil. Mais, comment reconstituer les orbites des planètes autour du Soleil, alors que les observations sont faites depuis la Terre ? C'est le travail que Kepler a réalisé, à partir des mesures de position faites par Tycho Brahé et que nous allons essayer de reproduire.*

### Introduction

Vu depuis la Terre, le Soleil décrit un grand cercle sur la sphère céleste, appelé écliptique. Sur cette ligne, à une date donnée, sa position peut être définie par l'angle  $\lambda_S = (\overline{TO}, \overline{TS})$ , appelé **longitude écliptique géocentrique du Soleil** (T est le centre de la Terre, S celui du Soleil et O une direction origine, constituée par la position de S au moment de l'équinoxe de printemps).

Toujours vue depuis la Terre, la planète Mars se déplace pratiquement sur la même ligne que le Soleil, ce qui signifie que les orbites de la Terre et de Mars dans le référentiel héliocentrique sont pratiquement dans un même plan. La position de Mars sur l'écliptique est alors repérée par le seul angle  $\lambda_M = (\overline{TO}, \overline{TM})$  appelé longitude écliptique géocentrique de Mars (M est le centre de la planète Mars).

Kepler avait utilisé les mesures de longitudes écliptiques géocentriques du Soleil et de Mars faites par Tycho Brahé.

Nous, nous utiliserons le site de l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides), pour relever les longitudes écliptiques géocentriques du Soleil et de Mars, à quelques dates bien choisies.

### Le choix des dates : période synodique et période sidérale

L'intervalle de temps entre deux oppositions de Mars (les directions du Soleil et de Mars, vues depuis

la Terre, sont opposées) est appelé période synodique de Mars et vaut  $S_M = 780$  jours.

Mais cette période n'étant pas égale à un nombre entier d'année, pendant la durée  $S_M$ , Mars n'a pas fait un tour autour du Soleil, mais une fraction  $\alpha$  de tour en plus. Pendant ce temps, la Terre n'a pas fait 2 tours autour du Soleil, mais  $(2 + \alpha)$  tours. Si on note  $T_T$  et  $T_M$  les périodes sidérales de la Terre et de Mars (durées d'un tour autour du Soleil), en supposant les mouvements uniformes, on en déduit que :

$$S_M = (1 + \alpha)T_M = (2 + \alpha)T_T$$

$$\text{d'où } \frac{1}{T_M} = \frac{1}{T_T} - \frac{1}{S_M}$$

Connaissant  $S_M = 780$  jours et  $T_T = 365,25$  jours, on en déduit la période sidérale de Mars :

$$T_M = 687 \text{ jours}$$

À deux dates séparées d'un nombre entier de périodes  $T_M$ , la planète Mars occupe la même position dans le référentiel héliocentrique.

### La trajectoire de la Terre dans le référentiel héliocentrique

#### Détermination d'un point de la trajectoire

Le 28 Août 2003, Mars était en opposition avec le Soleil : les centres : S du Soleil,  $T_o$  de la Terre et  $M_o$  de Mars sont alignés et les longitudes écliptiques géocentriques du Soleil et de Mars diffèrent de  $180^\circ$ .

$$\lambda_{M_0} = 334^\circ 58' \quad \text{et} \quad \lambda_{S_0} = 154^\circ 58'$$

Une période sidérale, soit 687 jours plus tôt, Mars occupait la même position  $M_0$  dans le référentiel héliocentrique tandis que la Terre occupait la position T. C'était le 10 Octobre 2001.

D'après l'IMCCE, les longitudes écliptiques géocentriques du Soleil et de Mars à cette date étaient :

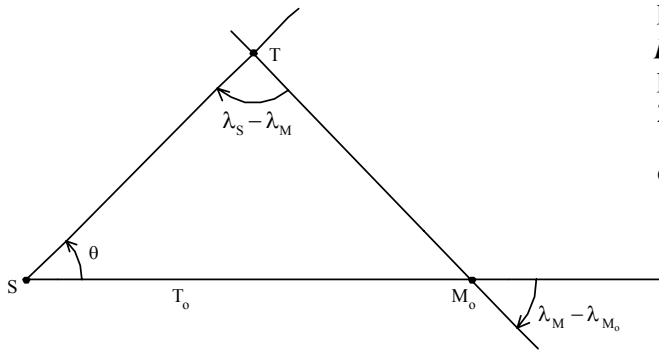
$$\lambda_M = 288^\circ 40' \quad \text{et} \quad \lambda_S = 197^\circ 27'$$

La distance  $SM_0$  étant choisie comme unité de longueur, ces mesures d'angles permettent de construire le triangle  $SM_0T$  et donc de placer la Terre le 10 Octobre 2001 dans le référentiel héliocentrique :

$$\left( \overrightarrow{M_0S}, \overrightarrow{M_0T} \right) = \lambda_M - \lambda_{M_0}$$

$$\left( \overrightarrow{TM_0}, \overrightarrow{TS} \right) = \lambda_S - \lambda_M$$

$$\theta = \left( \overrightarrow{SM_0}, \overrightarrow{ST} \right) = \lambda_S - \lambda_{M_0} + 180^\circ$$



Les constructions à la minute d'angle près étant bien difficiles à réaliser, nous calculerons la position de T (en utilisant les relations d'Al Kashi) en coordonnées polaires :

$$r = ST = SM_0 \times \frac{\sin(\lambda_M - \lambda_{M_0})}{\sin(\lambda_S - \lambda_M)}$$

$$\theta = \left( \overrightarrow{SM_0}, \overrightarrow{ST} \right) = \lambda_S - \lambda_{M_0} + 180^\circ$$

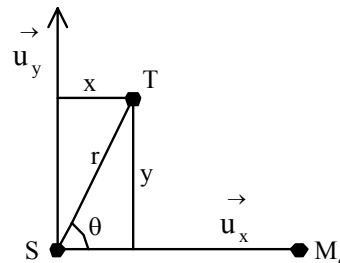
Soit  $\left( \begin{matrix} \rightarrow \\ u_x, u_y \end{matrix} \right)$  la base cartésienne dans le plan du mouvement (plan de l'écliptique) telle que  $\begin{matrix} \rightarrow \\ u_x \end{matrix} = \overrightarrow{SM_0}$ . Les coordonnées cartésiennes de la Terre le 10 Octobre 2001 dans cette base sont :

$$x = r \cos \theta \quad \text{et} \quad y = r \sin \theta$$

Il est possible de recommencer ce travail pour d'autres dates séparées du 28 Août 2003 par un nombre entier de périodes sidérales. Le tableau ci-dessous indique les dates utilisées ainsi que les longitudes écliptiques géocentriques du Soleil et de Mars à ces différentes dates, données par l'IMCCE :

date	$\lambda_S$	$\lambda_M$	r
15/05/1992	55°21'	7°44'	0,7324
2/04/1994	12°56'	350°48'	0,7241
18/02/1996	329°29'	332°41'	0,7156
5/01/1998	285°16'	314°34'	0,7122
23/11/1999	241°01'	298°05'	0,7150
10/10/2001	197°27'	288°40'	0,7231
15/07/2005	113°17'	22°22'	0,7362

À toutes ces dates séparées d'un nombre entier de périodes sidérales, la planète Mars occupe la même position  $M_0$  dans le référentiel héliocentrique. On peut de la même manière que pour le 10 Octobre 2001, calculer les coordonnées  $(r_i, \theta_i)$  puis  $(x_i, y_i)$  de la Terre dans le repère  $\left( S, \begin{matrix} \rightarrow \\ u_x, u_y \end{matrix} \right)$ .



La dernière colonne du tableau donne les valeurs des  $r_i$  ainsi calculés. Ces valeurs n'étant pas constantes, la trajectoire de la Terre n'est pas un cercle centré sur le Soleil. Nous supposons que c'est une ellipse dont nous allons rechercher les caractéristiques (centre, foyer et excentricité).

### L'ellipse des "moindres carrés"

En coordonnées cartésiennes, l'équation générale d'une ellipse peut s'écrire :

$$x^2 = ay^2 + bxy + cx + dy + f$$

où a,b,c,d,f sont les constantes caractérisant l'ellipse et sa position.

À l'aide d'un logiciel de calcul formel (ici, nous utiliserons Maple), on recherche les valeurs de ces cinq paramètres tels que l'ellipse passe au plus près des sept positions de la Terre précédemment déterminées. C'est l'ellipse des moindres carrés. Le calcul nous fournit les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} a &= -0,9996 \\ b &= -0,0002594 \\ c &= +0,01495 \\ d &= -0,01926 \\ f &= +0,5242 \end{aligned}$$

a et b sont des coefficients sans dimension mais c et d sont homogènes à des longueurs et f à une surface. L'unité de longueur choisie est la distance Soleil – Mars au moment de l'opposition du 28 Août 2003.

### Caractéristiques géométriques de l'orbite de la Terre

Si l'origine S était au centre de l'ellipse, son équation serait de la forme :

$$X^2 = \alpha Y^2 + \beta XY + \varepsilon$$

afin de satisfaire l'invariance par changement de X en -X et Y en -Y.

Les coefficients c et d n'étant pas nuls, le Soleil n'est pas au centre de l'ellipse et les coordonnées  $x_c$  et  $y_c$  du centre s'obtiennent en identifiant :

$$x^2 = ay^2 + bxy + cx + dy + f$$

$$(x - x_c)^2 = \alpha(y - y_c)^2 + \beta(x - x_c)(y - y_c) + \varepsilon$$

quelles que soient les valeurs de x et y. On en déduit :

$$\alpha = a$$

$$\beta = b$$

$$x_c = \frac{2ac - bd}{4a + b^2}$$

$$y_c = \frac{bc + 2d}{-b^2 - 4a}$$

$$\varepsilon = f + x_c^2 - ay_c^2 - bx_c y_c$$

Le calcul nous donne :

$$\begin{aligned} x_c &= +0,007477 \\ y_c &= -0,009635 \\ \varepsilon &= +0,5243 \end{aligned}$$

Si les axes de l'ellipse étaient colinéaires à  $\vec{u}_x$  et  $\vec{u}_y$ , l'équation de l'ellipse pourrait s'écrire sous la forme :

$$\frac{X^2}{A^2} + \frac{Y^2}{B^2} = 1$$

ce qui est impossible ici, le coefficient  $\beta$  étant non nul.

Pour l'écrire sous cette forme, il faudrait amener les axes du repère sur les axes de l'ellipse par une rotation d'un angle  $\varphi$ .

L'identification entre les deux équations de l'ellipse permet de montrer que :

$$a = -\frac{A^2 + B^2 \tan^2 \varphi}{B^2 + A^2 \tan^2 \varphi}$$

$$b = -\frac{2 \tan \varphi (A^2 - B^2)}{B^2 + A^2 \tan^2 \varphi}$$

$$\varepsilon = \frac{A^2 B^2 (1 + \tan^2 \varphi)}{B^2 + A^2 \tan^2 \varphi}$$

En résolvant ce système d'équations, il est possible de déterminer les constantes A, B et  $\varphi$  en fonction de a, b et  $\varepsilon$ . A et B sont les longueurs des deux axes de l'ellipse ;  $\varphi$  est l'angle formé par ces deux axes

avec la base  $\left( \vec{u}_x, \vec{u}_y \right)$ . Le calcul nous donne :

$$A = 0,724278$$

$$B = 0,724095$$

$$\tan \varphi = -3,600$$

Les mesures des deux axes permettent de calculer l'excentricité de l'orbite terrestre :

$$e = \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} = 0,0224$$

A, grand axe de l'orbite terrestre, est l'unité astronomique ; mais, l'unité de longueur choisie pour exprimer les longueurs des deux axes étant la distance Soleil – Mars au moment de l'opposition

du 28 Août 2003,  $\frac{1}{A}$  est la distance de Mars au Soleil, en unité astronomique, le 28 Août 2003 :

$$\frac{1}{A} = 1,3807$$

La longitude écliptique héliocentrique du grand axe de l'ellipse et donc de son périhélie P est :



$$\lambda_p = \varphi + \lambda_{M_0} = 260,5^\circ$$

Or, d'après l'IMCCE,

$$e = 0,0167 \quad ; \quad \frac{1}{A} = 1,38 \quad ; \quad \lambda_p = 283^\circ$$

Les valeurs trouvées pour l'excentricité et la direction du grand axe ne sont pas très bonnes.

En recommençant le travail avec davantage de points de mesure (13 au lieu de 7), les résultats ne sont pas améliorés.

Mais, si l'on suppose que le Soleil est au foyer de l'ellipse, on peut déterminer l'excentricité et la direction du grand axe par une autre méthode. L'origine des coordonnées est toujours en S, C étant le centre de l'ellipse (de coordonnées  $x_C$  et  $y_C$ ) et P l'intersection de la demi-droite CS et de l'ellipse (de coordonnées  $x_P$  et  $y_P$ ).

La droite CS fait avec l'axe des abscisses un angle défini par  $\tan \varphi = \frac{y_C}{x_C}$  ; la longitude écliptique

héliocentrique de P est donc  $\lambda_p = \varphi + \lambda_{M_0}$

Le calcul donne :

$$\lambda_p = 282,8^\circ$$

Les coordonnées de P sont les solutions du système d'équation :

$$x_p^2 = ay_p^2 + bx_p y_p + cx_p + dy_p + f$$

$$y_p = \frac{y_C}{x_C} x_p$$

L'excentricité de l'orbite de la Terre est :

$$e = \frac{CS}{CP} = \sqrt{\frac{x_C^2 + y_C^2}{(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2}}$$

Le calcul donne :

$$e = 0,0168$$

Les résultats sont donc nettement meilleurs.

Or, la principale approximation que nous ayons faite, consiste à supposer que les trajectoires de la Terre et de Mars sont rigoureusement dans un même

plan. Ceci revient à déterminer une projection de la trajectoire de Terre. Or, en projetant une ellipse, on obtient une autre ellipse dont le centre est la projection du centre mais dont le foyer n'est pas la projection du foyer et dont le grand axe n'est pas la projection du grand axe. Cependant, la projection de la droite CSP reste une droite, et sur une droite, les rapports des longueurs sont conservés. C'est sans doute pourquoi la deuxième méthode donne de bien meilleurs résultats.

## La trajectoire de Mars dans le référentiel héliocentrique

### Détermination d'un point de la trajectoire

Soit  $T_1$  et  $T_2$  les positions de la Terre dans le référentiel héliocentrique à deux dates séparées par une période sidérale de Mars soit 687 jours : le 1<sup>er</sup> Janvier 2003 et le 18 Novembre 2004 par exemple. À ces deux dates, **Mars occupe la même position inconnue M dans le référentiel héliocentrique** et on connaît les longitudes écliptiques géocentriques de Mars et du Soleil :

$$\lambda_{S1} = 280^\circ 54'$$

$$\lambda_{M1} = 230^\circ 3'$$

$$\lambda_{S2} = 236^\circ 41'$$

$$\lambda_{M2} = 214^\circ 57'$$

Pour chacune des deux dates, il est possible de déterminer la position de la Terre sur son orbite : la droite ST fait avec la droite  $SM_0$  un angle

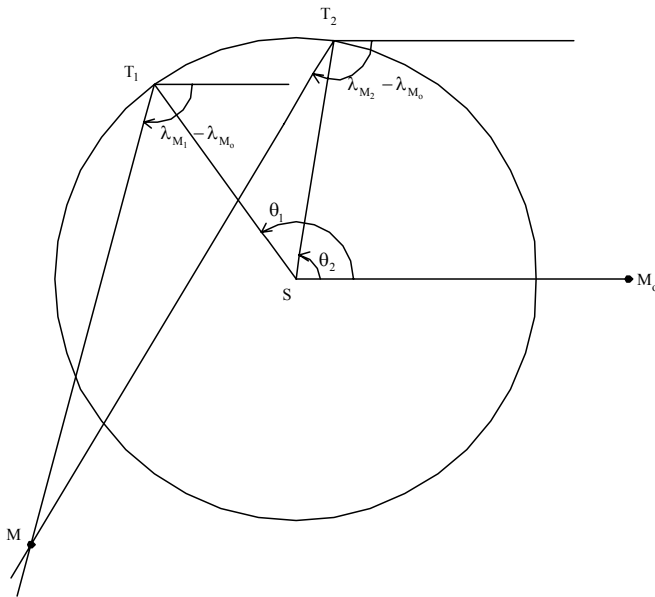
$$\theta = \left( \overrightarrow{SM_0}, \overrightarrow{ST} \right) = \lambda_S - \lambda_{M_0} + 180^\circ .$$

À ces deux dates, la planète Mars occupe la même position M.

Connaissant les angles :

$$\left( \overrightarrow{SM_0}, \overrightarrow{T_1M} \right) = \lambda_{M1} - \lambda_{M_0} \quad \text{et} \quad \left( \overrightarrow{SM_0}, \overrightarrow{T_2M} \right) = \lambda_{M2} - \lambda_{M_0}$$

on construit les droites  $T_1M$  et  $T_2M$ . Aux deux dates considérées, la planète Mars est à l'intersection de ces deux droites.



$M_0$  est toujours la position de Mars au moment de l'opposition du 28 Août 2003 ;

$\vec{SM}_0 = \vec{u}_x$  est toujours le vecteur unitaire du repère cartésien  $(S, \vec{u}_x, \vec{u}_y)$

Mais les constructions ne sont pas assez précises et nous aurons de nouveau recours au calcul pour déterminer les positions de  $T_1$ ,  $T_2$  et  $M$ . Les coordonnées de la Terre sont les solutions du système d'équation :

$$y = x \tan \theta$$

$$x^2 = ay^2 + bxy + cx + dy + f$$

Soit  $(x_1, y_1)$  et  $(x_2, y_2)$  les coordonnées de la Terre ainsi déterminées le 1<sup>er</sup> Janvier 2003 et le 18 Novembre 2004. Les coordonnées de la planète Mars à ces deux dates sont la solution du système d'équation :

$$y = y_1 + (x - x_1) \tan(\lambda_{M_1} - \lambda_{M_0})$$

$$y = y_2 + (x - x_2) \tan(\lambda_{M_2} - \lambda_{M_0})$$

Pour avoir plusieurs points de la trajectoire de Mars, il suffit de recommencer ce travail pour plusieurs couples de dates, chaque couple étant constitué de deux dates séparées par une période sidérale de Mars. Pour chaque date, il est nécessaire de connaître la longitude écliptique géocentrique du Soleil pour déterminer la position de la Terre dans le référentiel héliocentrique et la longitude

écliptique géocentrique de Mars pour déterminer la position de Mars toujours dans ce même référentiel.

La trajectoire de Mars étant supposée elliptique, il est nécessaire de considérer au moins 5 couples de dates ; pour plus de précisions, nous en avons utilisé huit.

dates	$\lambda_S$	$\lambda_M$	dates	$\lambda_S$	$\lambda_M$
01/01/2003	280°54'	230°02'	18/11/2004	236°40'	214°57'
01/04/2003	11°36'	287°34'	16/02/2005	328°07'	277°01'
01/07/2003	99°29'	335°26'	18/05/2005	57°51'	342°42'
01/10/2003	188°08'	330°12'	18/08/2005	145°51'	41°25'
01/01/2002	281°10'	347°26'	19/11/2003	236°58'	345°29'
01/04/2002	11°50'	51°47'	17/02/2004	328°21'	39°05'
01/07/2002	99°44'	112°20'	18/05/2004	58°03'	97°09'
01/10/2002	188°23'	171°05'	18/08/2004	146°03'	155°13'

### Ellipse des « moindres carrés »

Par la même méthode que pour la Terre, on recherche l'équation de l'ellipse passant au plus près de ces huit points. Elle est de la forme :

$$x^2 = a_M y^2 + b_M xy + c_M x + d_M y + f_M$$

et le logiciel de calcul formel nous fournit les valeurs des cinq constantes caractérisant la "meilleure" ellipse :

$$a_M = -1,0100$$

$$b_M = -0,003108$$

$$c_M = -0,2063$$

$$d_M = -0,006017$$

$$f_M = +1,2065$$

l'unité de longueur étant toujours la distance  $SM_0$ .

## Caractéristiques géométriques de l'orbite de Mars

L'équation de l'orbite de Mars peut aussi être écrite sous la forme :

$$(x - x_{CM})^2 =$$

$$a_M (y - y_{CM})^2 + b_M (x - x_{CM})(y - y_{CM}) + \varepsilon_M$$

où  $x_{CM}$  et  $y_{CM}$  sont les coordonnées cartésiennes du centre de l'ellipse de Mars. Le calcul donne :

$$x_{CM} = -0,10316$$

$$y_{CM} = -0,002820$$

$$\varepsilon_M = +1,2171$$

$A_M$  et  $B_M$  les longueurs des axes de l'ellipse et  $\varphi_M$  l'angle formé par ces axes avec le repère  $(\vec{u}_x, \vec{u}_y)$

sont les solutions du système d'équations :

$$a_M = -\frac{A_M^2 + B_M^2 \tan^2 \varphi_M}{B_M^2 + A_M^2 \tan^2 \varphi_M}$$

$$b_M = -\frac{2 \tan \varphi_M (A_M^2 - B_M^2)}{B_M^2 + A_M^2 \tan^2 \varphi_M}$$

$$\varepsilon_M = \frac{A_M^2 B_M^2 (1 + \tan^2 \varphi_M)}{B_M^2 + A_M^2 \tan^2 \varphi_M}$$

Le calcul donne :

$$A_M = 1,10337 \quad ; \quad B_M = 1,09764$$

Le grand axe de l'orbite de Mars, mesuré en unité astronomique est donc :

$$\frac{A_M}{A} = \frac{1,10337}{0,724278} = 1,523 \text{ u.a.}$$

En supposant que le Soleil est au foyer de l'ellipse, on détermine la direction du grand axe, identique à celle de la droite  $C_M S$  :  $\lambda_{PM} = \varphi_M + \lambda_{M_0}$  et

$$\tan \varphi_M = \frac{y_{CM}}{x_{CM}}$$

Le calcul donne :  $\lambda_{PM} = 336,5^\circ$

Pour déterminer l'excentricité de l'orbite, on détermine la position du périhélie  $P_M$ , intersection de la droite  $C_M S$  et de l'orbite de Mars. Ses coordonnées  $x_{PM}$  et  $y_{PM}$  sont donc les solutions du système d'équation :

$$x_{PM}^2 = a_M y_{PM}^2 + b_M x_{PM} y_{PM} + \dots$$

$$c_M x_{PM} + d_M y_{PM} + f_M$$

$$y_{PM} = \frac{y_{CM}}{x_{CM}} x_{PM}$$

L'excentricité de l'orbite de la Mars est :

$$e_M = \frac{C_M S}{C_M P_M} = \sqrt{\frac{x_{CM}^2 + y_{CM}^2}{(x_{PM} - x_{CM})^2 + (y_{PM} - y_{CM})^2}}$$

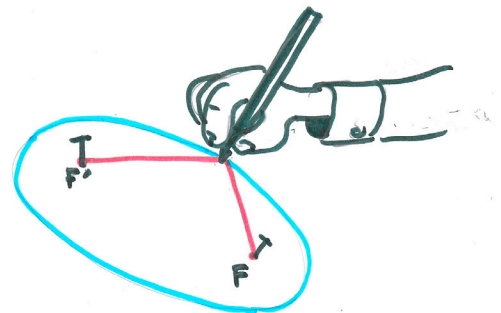
Le calcul donne :  $e_M = 0,0934$

D'après l'IMCCE,

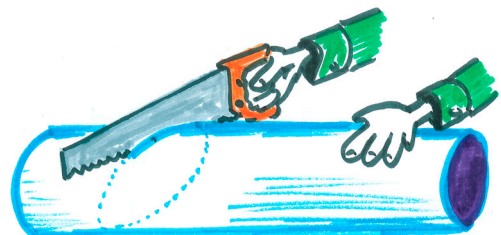
$$\frac{A_M}{A} = 1,524 \text{ u.a.} \quad ; \quad \lambda_{PM} = 336,4^\circ \quad ; \quad e_M = 0,0934$$

Les longitudes écliptiques géocentriques du Soleil et de Mars à des dates bien choisies, nous ont permis de reconstituer les trajectoires de la Terre et de Mars dans le référentiel héliocentrique. Ces trajectoires sont des ellipses ayant le Soleil pour foyer. C'est la première loi de Kepler. ■

## Comment tracer une ellipse...



Avec une ficelle....



Avec une scie...

Nous verrons la prochaine fois comment dessiner une ellipse approchée avec une règle et un compas... Cherchez... Ce n'est pas facile !

# LOGICIELS

## STELLARIUM : un planétarium dans votre ordinateur

Jean-Noël Terry

**Résumé :** Nous nous proposons de vous présenter, au fil des numéros des Cahiers, quelques logiciels qui présentent un grand intérêt. Ils sont gratuits, nous les utilisons, et notre présentation doit vous aider à faire votre choix suivant vos activités et vos centres d'intérêt.

*Stellarium est un planétarium pour ordinateur. Il ne remplace pas les logiciels permettant de préparer ses cartes avant une observation, mais il permet la simulation du ciel en alliant rigueur et beauté. Donc, il a toutes les qualités nécessaires pour l'éducation et la découverte à tout âge.*

### Installation

Il faut télécharger le logiciel à l'adresse <http://www.stellarium.org>. Il est disponible pour les systèmes Linux, Mac et Windows, ce qui est à souligner. Tout installé, il occupe moins de 30 Mo sous Windows.

Il existe un mode d'emploi en français (au format \*.pdf), très complet, l'installation ne pose pas de problème, mais il permet de connaître rapidement le logiciel. De plus il inclut plus de vingt pages d'initiation à l'astronomie.

Enfin, dans l'esprit des « logiciels libres », il existe un forum, accessible via le site, pour poser des questions et récupérer des ajouts proposés par d'autres passionnés.

### Brève présentation

Je ne reviendrai pas sur ce qui est très bien décrit dans le mode d'emploi, je veux simplement pointer quelques particularités.

Le choix du site se fait par ses coordonnées, et on peut choisir un paysage, rendant réaliste et beau l'écran de travail. On peut même choisir un paysage lunaire ou martien, ou le sien si on réalise un panorama en numérique... Cette présentation peut être une bonne transition pour apprendre à lire une carte du ciel.

Il est possible d'afficher les constellations par leur dessin, avec ou sans nom, ou par un dessin artistique. On peut demander la grille alt-azimutale ou équatoriale, l'écliptique, l'équateur...

Bien entendu, le fond de ciel se teinte en fonction de l'heure, réalisant l'aube ou le coucher à volonté. La Voie Lactée est très réaliste.

La gestion du temps est intéressante. On peut fonctionner en temps réel. Il est très pédagogique de prendre une planète, qui semble immobile, de zoomer en restant centré sur elle. On la voit alors quitter l'écran comme cela se produit dans un télescope, on



peut activer la monture équatoriale pour montrer la compensation.  
 La vitesse de déroulement du temps peut aussi être accélérée, il est possible de procéder par saut dans les deux sens, ce qui ouvre la porte à de multiples simulations. Bien entendu, on peut entrer directement la date de son choix.

La recherche d'objets se fait par nom d'étoiles ou numéro du catalogue Hipparcos, par nom de constellation, par numéro pour les objets du catalogue Messier.  
 Bref, vous l'avez compris, la seule limite sera celle de votre imagination et de votre temps !

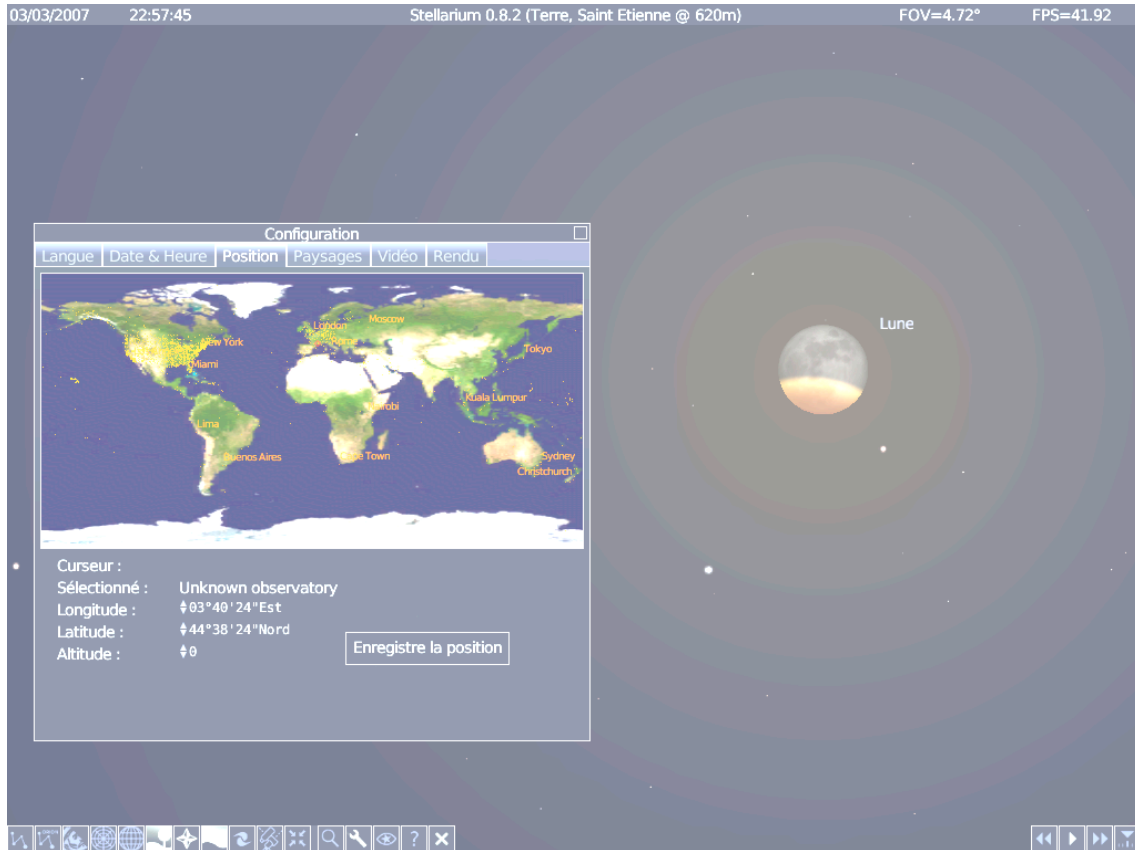


Figure 1 : Le fenêtre de configuration avec l'éclipse du 3-4 mars 2007 en arrière plan



Figure 2 : Ci-dessus la simulation de l'occultation de Japet par Saturne le 14 février 2007.

# AVEC NOS ÉLÈVES

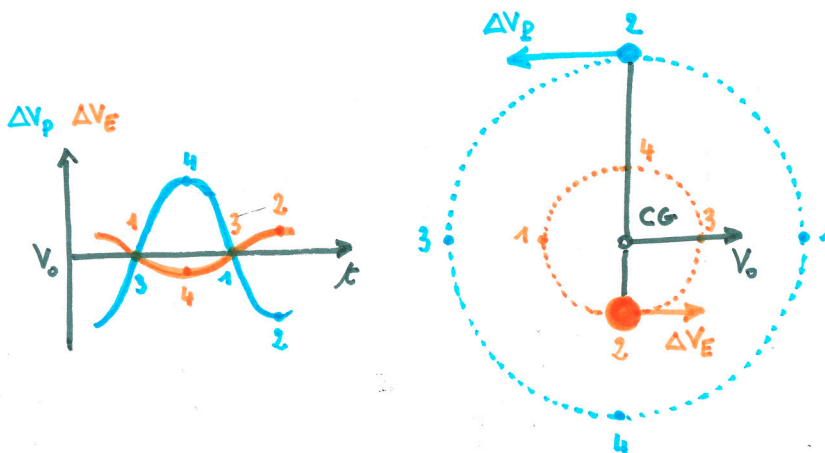
## Détection de planètes extrasolaires : correction de l'exercice du CC117

Emilie Wernli et Georges Paturol

**Résumé :** Voici donc la correction de l'exercice qu'Alain Sarkissian proposait dans le CC117, à propos de la première mise en évidence, par M. Mayor et D. Queloz, de l'existence d'une exoplanète autour de l'étoile 51Peg. La mesure très précise des longueurs d'onde permet de calculer la vitesse relative de l'observateur et de l'étoile par l'effet Doppler-Fizeau..

La présence d'une planète autour d'une étoile induit un mouvement sur l'étoile elle-même, car le couple tourne, en fait, autour du centre de gravité commun. Dans l'exercice proposé nous utilisons une seule raie spectrale de longueur d'onde nominale  $\lambda_0=604,142717$  nm (soit  $6041,42717$  Å). Mayor et Queloz utilisaient toutes les raies du spectre, ce qui leur a permis de trouver un résultat bien plus précis.

**Étapes 1 et 2 :** Voici le schéma qui répond aux deux premières questions : On a supposé que l'observateur était exactement dans le plan de l'orbite de l'exoplanète et qu'il observait la planète orbitant autour de l'étoile depuis la gauche du schéma. Quand un astre s'éloigne de l'observateur, la vitesse est comptée positivement. Le couple étoile-planète tourne autour du centre de gravité commun (CG) animé d'une vitesse  $V_0$  par rapport à l'observateur. La masse de l'étoile étant plus importante que la masse de la planète, l'amplitude du mouvement de l'étoile est très faible.



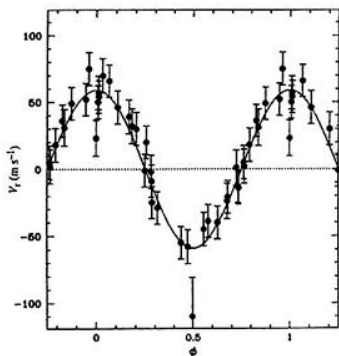
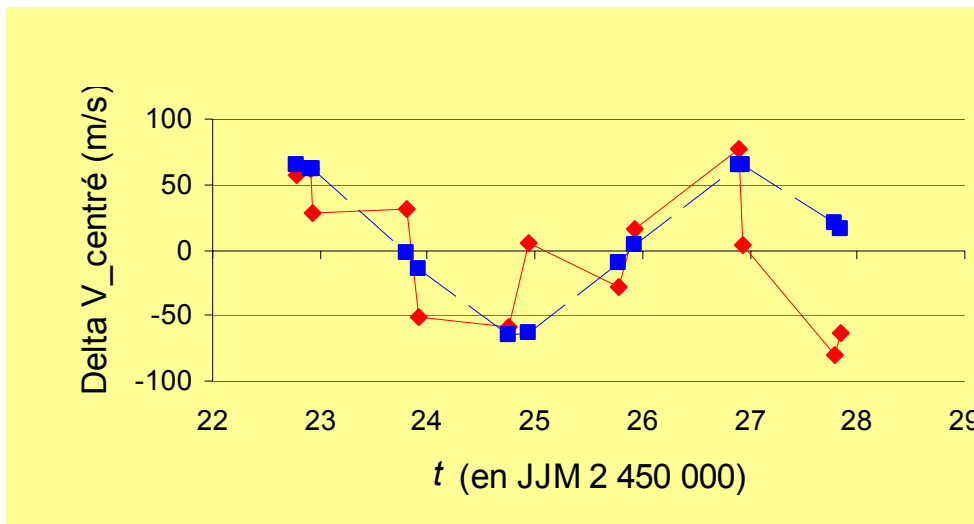
**Étapes 3, 4 et 5 :** Sur les raies spectrales de l'énoncé, il est possible de mesurer la longueur d'onde centrale pour différents jours. Pour ce corrigé nous prendrons la valeur déterminée par un ajustement gaussien de la raie (cette valeur est donnée sur chaque raie). Tous les calculs se font avec un tableur (table ci-dessous).

À partir du décalage  $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$  de la longueur d'onde par rapport à la valeur nominale, on déduit la vitesse relative  $\Delta V=c.\Delta\lambda/\lambda_0$  observée pour l'étoile (la planète n'étant pas assez lumineuse pour contribuer au spectre) pour les différents jours. La correction BERV prend en compte le mouvement de l'observateur (rotation de la Terre sur elle-même et vitesse orbitale de la Terre autour du Soleil). On obtient ainsi la vitesse vraie de l'étoile par rapport au Soleil. C'est ce que nous appelons le " $\Delta V_{\text{corrigé}}$ ". La valeur moyenne n'est pas nulle car le couple planète étoile se déplace par rapport au Soleil. On corrige cette vitesse de la valeur moyenne calculée,  $V_0=57,96349164$  m/s, ce qui permet d'avoir la vitesse radiale rapportée au centre de gravité du

couple planète étoile (aux effets de projection près). C'est ce que nous appelons le " $\Delta V_{\text{centré}}$ ". On trace donc le graphique avec le tableur en portant  $\Delta V_{\text{centré}}$  en fonction du temps (mesuré en "pseudo" Jours Juliens Modifiés<sup>1</sup>).

**Étape 6 :** Si nous superposons une sinusoïde (en bleu) qui reproduit au mieux la courbe observée (en rouge), nous obtenons : une période  $P = 4$  jours et un extremum de l'amplitude à  $t = 25$  jours en JJM, valeurs très proches de ce que trouvait Mayor et Queloz (4,23077 jours et  $t=24,97$  jours).

$t$ enJJM	BERV	$\lambda$	$\Delta\lambda$	$\Delta V$	$\Delta V$ corrigé	$\Delta V$ centré	$\Delta V$ théorique
2450000	(m/s)	Angström	Angström	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
22,7874223	-19310,4	6041,8163	0,38913	19309,71539	-0,684613382	57,27887826	64,641428
22,9214733	-19608,5	6041,8224	0,39523	19612,41439	3,914391708	61,87788335	62,01626746
22,9339507	-19632,5	6041,8222	0,39503	19602,48983	-30,01016586	27,95332578	61,64490019
23,8023028	-19678,8	6041,8232	0,39603	19652,11262	-26,68737812	31,27611352	-2,697316047
23,9206618	-19940	6041,8268	0,39963	19830,75466	-109,2453423	-51,28185068	-14,01273921
24,7502482	-19892,8	6041,8257	0,39853	19776,16959	-116,6304088	-58,66691715	-64,52101513
24,9437682	-20309,8	6041,8354	0,40823	20257,51063	-52,2893679	5,674123741	-64,10728411
25,7817282	-20284,4	6041,8342	0,40703	20197,96329	-86,43671315	-28,47322151	-10,38134082
25,9330946	-20611,9	6041,8417	0,41453	20570,13419	-41,76580524	16,1976864	4,182937052
26,8920519	-20848,1	6041,8477	0,42053	20867,87092	19,77092111	77,73441275	64,78035261
26,9355134	-20931,7	6041,8479	0,42073	20877,79548	-53,90452137	4,058970268	64,98983328
27,783198	-20917,2	6041,8459	0,41873	20778,5499	-138,6500968	-80,68660515	21,03636616
27,8365655	-21038,4	6041,8487	0,42153	20917,49371	-120,9062912	-62,94279956	16,10097453
					-57,96349164		



© Mayor et Queloz - site [www.obs-hp.fr](http://www.obs-hp.fr)  
Vitesse radiale de 51Peg

Mayor et Queloz utilisaient non pas une raie mais toutes les raies du spectre. La courbe qu'ils ont obtenue était très bien définie. Allez voir le site de l'OHP ([www.obs-hp.fr](http://www.obs-hp.fr)). Vous trouverez une description technique du spectrographe ELODIE. Vous pourrez vous convaincre que cette découverte n'était pas due à la chance, mais résultait d'une remarquable préparation. ■

<sup>1</sup> Les Jours Juliens Modifiés officiels sont obtenus à partir des Jours Juliens auxquels on retranche 2400000,5 jours (cf. CC114, p.21)



# REMUE-MÉNINGES

Sur cette mauvaise photo (téléobjectif 500mm à miroir + canon 350D) on voit nettement un phare à côté d'une île. Cette photo est prise depuis la pointe de la Cride à Sanary sur Mer, "au bord de l'eau" (5 m environ au dessus du niveau de la mer). L'île est l'île de Riou au large des calanques de Cassis (altitude : 190 m). Le phare ne peut être que le phare du Planier (70 m à 80 m au dessus de l'eau). La distance du phare est comprise entre 44,6 et 45 km. Si je ne tiens pas compte de la réfraction il n'est pas visible !

Qui peut me dire par quels calculs je peux trouver la hauteur de phare visible au dessus de ma ligne d'horizon... en tenant compte de la réfraction ? Je signale que la réfraction "à l'horizon" peut-être (en première approximation ?) considérée égale à 34' (Gianni Pascoli - Éléments de mécanique céleste, page 10 en note). Merci d'avance d'un coup de pouce !

Michel Paulhiac ■



La solution de ce remue-ménings est donnée en page 39

**Horizontalement:**

- I:** Académicien des sciences amant de Mme du Châtelet. **II:** Fin de verbe - époux de Desdémone en italien. **III:** Portait ombre - Explosif. **IV:** Charles ou David - Noir en astronomie. **V:** Mets espagnol - Arsenic. **VI:** Une révolution - Placé en orbite - Après-midi en anglais. **VII:** Lettre d'Aragon - Almanach. **VIII:** Connu - Soumis à une source ionisante. **IX:** Écossais - Préposition - Note. **X:** Fondé en 1945 à l'initiative de R. Dautry et F. Joliot-Curie - Personnel - Compose la Terre à 35%.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I</b>										
<b>II</b>			■							■
<b>III</b>						■				
<b>IV</b>		■				■				
<b>V</b>						■				■
<b>VI</b>			■				■			
<b>VII</b>					■					
<b>VIII</b>			■							
<b>IX</b>					■		■			
<b>X</b>				■			■			

**Verticalement:**

- 1:** Mesure pour grandes distances. **2:** Au milieu de la Marne - Grenouille. **3:** Queue de météore - Possessif. **4:** Étudiée par Newton ? **5:** Astre. **6:** Début de renouveau - Monnaie d'or. **7:** Thallium - Ont fait la réputation de Kepler. **8:** Au-delà - temps. **9:** Contribue à la réflexion. **10:** Référence de temps - Sorte de Laser.

(La solution de ces mots croisés est donnée en page 40)

Jipé ■



# LECTURE POUR LA MARQUISE

## **Le grand univers et nous.**

Daniel Kunth, éd. Bayard, ISBN 3-227-47461-0

C'est un petit livre de 92 pages d'une collection, « Les petites conférences », qui s'adresse aux enfants pour « éclairer et éveiller ». Deux petits exposés, l'un sur l'univers, l'autre sur la vie des étoiles, sont suivis d'un jeu de questions-réponses.

Les choses sont dites simplement, ce qui ne veut pas dire avec des mots simples. Ce livre s'adresse donc plutôt à des collégiens ou à des adultes n'ayant pas de connaissances scientifiques. Il donne envie d'aller plus loin et peut donc être le point de départ d'un approfondissement.

Il devrait trouver place dans un CDI de collège.

## **L'univers.**

Jean-Pierre Verdet, éd. Le Cavalier Bleu, collection « Idées reçues », ISBN 2-84670-069-9.

Voici encore un livre de petit format, mais dense par les idées qu'il présente. Il s'agit, partant d'une phrase « toute faite », de démêler le faux du vrai. C'est cette démarche qui donne son titre à la collection.

L'intérêt de l'ouvrage n'est, paradoxalement, pas là. Il est difficile de placer l'univers en expansion, infini ou peuplé de galaxies, car, sur ces points, le « on » n'a guère d'idée ! À ce titre, seule l'influence de la Lune répondrait à la définition.

Mais s'il faut conseiller la lecture de ce livre, c'est par le point concis, mais précis, et documenté sur le plan historique, qui est fait pour chaque thème abordé.

En quelques pages la synthèse et le fil conducteur sont donnés ; à vous, une fois de plus, de prolonger l'étude si vous en avez le goût.

## **La chanson de ma vie.**

Paul Couteau, éd. du Losange, ISBN 2-84295-121-2.

En 2000, Paul Couteau a publié « Le ciel est mon jardin ». Jeune retraité, il nous guidait alors dans le jardin des étoiles, côté technique et histoire. Le livre présenté ici retrace le parcours d'un astronome professionnel et, surtout, la vie d'une vocation.

Car le plus court chemin qui le mena aux étoiles doubles n'est certes pas la ligne droite. Né

dans une famille plutôt tournée vers les « humanités », Paul Couteau devra sacrifier à la théorie avant de retrouver sa passion de l'observation à la grande lunette de l'Observatoire de Nice, où il observera les étoiles doubles de 1951 à 2000.

On sent, tout au long de ce récit d'une vie, la passion du ciel. Les initiateurs de l'auteur furent Camille Flammarion, l'abbé Moreux, Pierre Rousseau... en effet, à la naissance d'une vocation, il y a le plus souvent une rencontre.

Comme l'auteur l'écrit, les circonstances lui ont fait chevaucher deux époques de l'astronomie : celle de l'observation visuelle et celle de la technologie qui éloigne l'homme de l'oculaire.

Restent la passion et la joie de découvrir, puissent celles de Paul Couteau susciter à leur tour de jeunes vocations.

## **Terre, une planète pas comme les autres**



Au cours des dernières décennies, l'installation de satellites scientifiques autour de la Terre et l'exploration spatiale du Système solaire ont fait beaucoup progresser non seulement la connaissance de l'état actuel de notre planète, mais aussi celle de son histoire, de sa position singulière dans le concert des planètes qui forment le Système solaire. Le fil conducteur du dossier proposé par *l'Astronomie* dans son numéro de mars-avril 2007 est précisément la Terre... une planète pas comme les autres.

Il y a cinquante ans, la science planétaire pensait avoir fermement campé les principaux acteurs du Système solaire et leur formation semblait admise dans ses grandes lignes. Mais depuis qu'ont été découverts et observés des disques protoplanétaires et des exoplanètes, certaines idées sont remises en cause et il semblerait que, loin d'être un modèle, notre Système solaire serait plutôt une curiosité. Parallèlement, les recherches en planétologie se poursuivent activement pour comprendre les étapes de formation de la Terre et de sa différenciation d'avec les autres planètes. Les articles de **Alessandro Morbidelli** et de **Gabriel Tobie** traitent de ces sujets et apportent les réponses scientifiques d'aujourd'hui, avec quelques certitudes et encore beaucoup d'interrogations..

La Terre est ronde, affirmait Aristote. Il a fallu ensuite plus de 25 siècles pour que des images, prises à bonne distance, nous la montre ainsi, ronde, et aussi très belle, bleue de ses océans, blanche de ses nuages et ocre de ses continents. Un spectacle fabuleux que les spationautes décrivent avec émotion. Et sur lequel **Alexandre Szames**, dans ce dossier, apporte une réflexion originale. Les images que **Gilles Dawidowicz** a rassemblées et commentées pour *l'Astronomie* sont à la fois un régal pour les yeux et une documentation enrichissante sur tout ce que nous apprend la « vue d'en haut ».

Cette année 2007 a été baptisée « année polaire internationale », pour attirer l'attention et concentrer des efforts de recherche sur ces régions extrêmes de notre planète. À cette occasion, sous la plume de **André Rognon**, nous pourrions porter un regard nouveau et comparateur sur les glaces polaires terrestres et martiennes. Leurs évolutions temporelles et spatiales sont plus différentes qu'il n'y paraît à première vue. La « géomorphologie » martienne est à inventer... tout y est tellement différent de chez nous !

La Terre est environnée d'une magnétosphère qui la protège des assauts du vent solaire. En cela, elle n'est pas un cas unique dans le Système Solaire. **Philippe Zarka** présente cet univers des champs magnétiques et en explique les effets, jusqu'aux plus spectaculaires, les aurores boréales..

C'est bien évidemment la présence d'eau liquide, à la surface de la Terre qui donne à notre planète son caractère d'unicité, tout au moins dans le Système solaire. C'est l'eau qui a dissout une grande partie du CO<sub>2</sub> de notre atmosphère primitive, c'est l'eau qui, par sa présence dans les roches constituant le manteau, permet la tectonique des plaques, c'est l'eau qui, présente dans les nuages, joue un rôle essentiel dans la diversité

des zones climatiques, c'est l'eau qui a été le berceau de la vie, en a permis le développement et en assure le maintien, et l'on pourrait poursuivre cette énumération des « vertus » de l'eau. Dans leurs articles, **Thérèse Encrenaz**, pour les atmosphères planétaires, **Gabriel Tobie**, pour la géophysique, **André Brack** pour les phénomènes vitaux, présentent et expliquent les mécanismes sous-jacents et soulignent les énigmes qui sont encore dans l'attente d'explications.

Quel est l'avenir de la Terre ? L'histoire compliquée de son passé, connue grâce à la géologie, enseigne de rester modeste et de se garder d'affirmations péremptoires. En particulier, l'histoire de son climat qui nous est présentée par **Jean Jouzel** est mouvementée ; des épisodes de grandes glaciations séparées par des périodes interglaciaires chaudes ont jalonné le dernier milliard d'années. Des éruptions volcaniques d'une extrême violence ont pu avoir, dans le passé, des conséquences climatiques considérables, et même catastrophiques pour certaines espèces vivantes. Cependant, ainsi que l'explique Jean Jouzel, l'actuelle tendance au réchauffement climatique est une certitude, et le rôle accélérateur joué par les activités humaines n'est guère mis en doute aujourd'hui ; il suffit de consulter le dernier rapport du GIEC, récemment réuni à Paris, pour s'en convaincre. Nombreuses sont les conséquences prévisibles et parfois déjà amorcées... l'élévation du niveau de la mer, des déséquilibres environnementaux conduisant à la disparition d'espèces animales et végétales, la fonte des glaciers, la désertification de certaines régions, etc. Certaines sont très inquiétantes... par exemple, l'actuel réchauffement produit le ramollissement et même la fusion du sous-sol gelé, riche en tourbes, en Sibérie, entraînant un dégagement important de méthane, gaz à effet de serre plus puissant, donc plus dangereux que le CO<sub>2</sub>.

Toutes ces questions, sont traitées, dans un langage clair et précis, par d'éminents spécialistes et constituent un dossier d'une soixantaine de pages, largement illustré, inclus dans le numéro de mars-avril de *l'Astronomie*, la revue de la Société Astronomique de France. Ce sujet nous concerne tous mais il intéressera plus particulièrement les enseignants de SVT.

Marie-Claude Paskoff

Il est possible de se procurer ce numéro de *l'Astronomie* en contactant la SAF au 01 42 24 13 74 ou à [saf.secretariat@wanadoo.fr](mailto:saf.secretariat@wanadoo.fr). Prix du numéro : 9 euros.

■

## Le DVD offert aux abonnés

Votre abonnement 2007 vous donne droit au nouveau DVD des archives du CLEA. Ce DVD, que vous trouverez dans ce numéro, contient les archives des Écoles d'Été et des Cahiers Clairaut. L'utilisation est très intuitive : cliquez sur l'article qui vous intéresse et c'est tout ! Pour revenir à la liste des articles, utilisez les flèches de navigation. Alors, bonne re-découverte !

# LES POTINS DE LA VOIE LACTÉE

## Comète McNaught

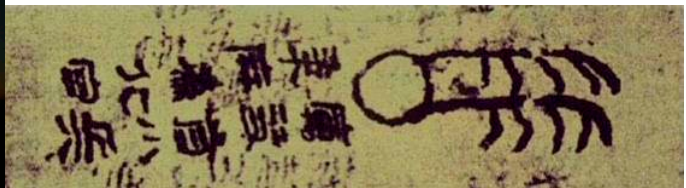
Qui d'entre vous n'a pas entendu parler de cette merveilleuse comète, de passage très bref dans notre hémisphère, déployant cependant sa queue magistrale devant les yeux ébahis des habitants de l'hémisphère Sud ? Voici une photo prise par son découvreur Robert McNaught (Fig. ci-dessous), et en clin d'oeil une reproduction de la « soie de

Mawangdui » relatant l'observation par des Chinois (~300 av JC) d'une comète dont on comprend désormais plus aisément la forme. Des bursts d'activité dus à la fragmentation de son noyau expliqueraient cette structure en peigne.

EW■



Comète McNaught ©McNaught



Détail de la « soie de Mawangdui » ©NASA/JPL

## Proche cousine de notre planète !

Une équipe d'astronomes Suisses-Français-Portugais ont découvert une nouvelle planète tellurique située à 20,5 AL. Avec un rayon seulement de 1,5 fois plus grand que celui de notre planète, cette nouvelle cousine est tout de même 5 fois plus massive. La grande originalité de cette découverte réside dans le fait que cette planète se situe dans la zone "habitable" autour de son étoile-hôte. Relativement proche d'elle (une année sur cette planète dure 13 jours), sa température varierait entre 0 et 40°C, l'étoile n'étant qu'une naine rouge. Ce ne serait pas la seule planète orbitant autour de l'étoile Gliese 581 : celle-ci est déjà connue pour abriter une planète de la masse de Neptune, et les astronomes soupçonnent la présence d'une troisième planète, de 8 fois la masse de la Terre.



Illustration 1: Vue d'artiste du système planétaire autour de la naine rouge Gliese 581. Crédit : ESO

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

À l'école d'été 2006 une devinette circulait, qui demandait à peu près ceci : "Quelle est la différence entre un illettré ?" La réponse était : "Il ne sait ni lire".

Nous pensions ce genre d'humour réservé à un monde surréaliste. Eh bien non ! Voici la devinette trouvée dans un calendrier très sérieux, au demeurant fort bien fait.



Sciences & techniques

Pendant un orage, par combien faut-il diviser le nombre de secondes qui s'écoulent entre le moment où l'on voit l'éclair et celui où l'on entend le tonnerre ?

St Charles	Samedi	Dimanche	L	M	J	V	S	D	
Ste Sylvie	4	5		1	2	3	4	5	
Vacances scolaires			6	7	8	9	10	11	12
			13	14	15	16	17	18	19
			20	21	22	23	24	25	26
			27	28	29	30			
			Novembre						

### Note à benêts :-)

*Vous l'avez compris, évidemment, il faut diviser par 3 le temps mesuré en seconde pour avoir, en kilomètre, la distance qui nous sépare du lieu de l'orage.*

## LA VIE ASSOCIATIVE

### Une triste nouvelle

Nous avons eu la grande tristesse d'apprendre la mort de Janine Dupré, épouse de Jacky notre trésorier adjoint. Janine avait participé à plusieurs Écoles d'Été du CLEA.

Elle a supporté la souffrance avec un courage qui force l'admiration. Nous présentons à sa famille nos condoléances très sincères.

Pensez à vous inscrire rapidement à l'École d'Été d'Astronomie du CLEA du 17 au 24 août ; une occasion unique de passer des vacances studieuses et agréables dans un lieu enchanteur (le col Bayard près de Gap). Toute l'information est sur notre site : <http://clea-astro.eu>

### Inscription des Cahiers Clairaut à la CPPAP

Les Cahiers Clairaut doivent renouveler leur inscription à la Commission Paritaire des Publications et Agences de Presse pour bénéficier d'un tarif préférentiel d'affranchissement. Une condition à remplir est que l'abonnement aux Cahiers Clairaut soit indépendante de l'adhésion au CLEA, condition déjà en vigueur pour 2007 (et même depuis la fin 2006).

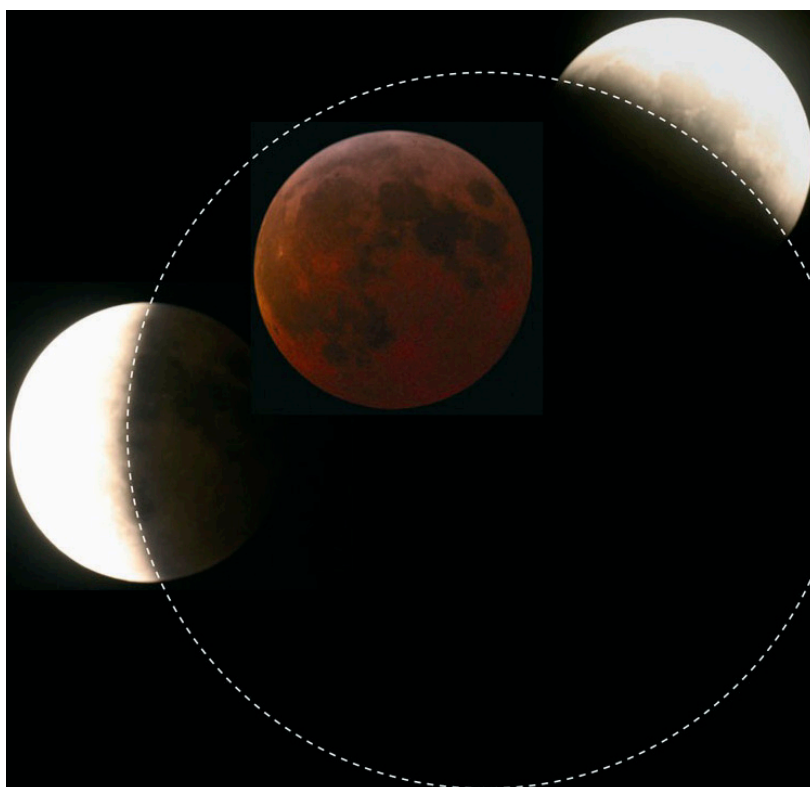
**Rappelez à tous cette règle : vous pouvez vous abonner sans adhérer au CLEA.**

## Quelques belles photos prises par nos amis .



*Photo de la Lune par M. Vignand à  
3h14 heure locale le 3/03/2007*

Caractéristiques : lunette Pronto  
480mm + oculaire Célestron Plössl  
25mm + boîtier Nikon D100 ;  
exposition 15s ; sensibilité iso 1600.



*Photo-montage de l'éclipse de Lune  
de mars 2007, par Pierre Causeret.*

Ce montage est fait de photos prises  
avec un reflex numérique (300 D) au  
foyer d'un Maksutov de 150 mm de  
diamètre et 1,5 m de focale. Les  
temps de pose sont à peu près 1/10 s  
pour l'éclipse partielle et 1,5 s pour  
la totalité.

On peut se poser le problème de la  
forme de l'ombre de la Terre. En  
effet l'ombre se déplace par rapport  
aux étoiles du fait de la rotation de la  
Terre autour du Soleil. En fait, c'est  
un problème de repère. Dans un  
repère lié à l'axe Soleil Terre,  
l'ombre n'a pas bougé. C'est ce  
dernier que j'ai choisi pour faire mon  
montage, l'ombre est donc fixe et  
parfaitement circulaire.

PC

*Amusez vous à trouver la distance  
Terre-Lune avec ce montage !*

**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](mailto:jripert@ac-toulouse.fr).

# LE COURRIER DES LECTEURS

Dans le Cahier 117, l'article de Blaise Simon intitulé : "*Comment Kepler a déterminé l'orbite de la Terre autour du Soleil*" a suscité beaucoup d'intérêt, preuve en est le nombre de questions posées sur notre liste de diffusion. Tout est parti du traitement que notre ami Michel Cauchois a fait de l'article en question en utilisant l'outil Cabri-Géomètre, outil bien connu des professeurs de mathématiques. Sans reproduire les questions dans leur intégralité, nous donnons la réponse de l'auteur lui-même à ces interrogations.

Merci donc à Blaise Simon pour ces précisions et bravo pour cet article. Vous trouverez dans le présent numéro une application complémentaire sur le sujet, dans un article de Béatrice Sandré.

Comment se fait-il que la longitude de Mars en 1583 soit donnée par Kepler à la seconde près, alors que les observations sont à la minute près ?

Je pense que cette longitude, Kepler l'a obtenue par le calcul dans des essais antérieurs qui se sont révélés infructueux, et qu'il l'a néanmoins utilisée telle quelle dans l'exploitation de sa nouvelle hypothèse. Néanmoins Kepler ne donne pas ses résultats à la seconde près. Je répète ce que j'ai dit dans cette note : 1) Je laisse à Kepler la responsabilité de ses calculs. 2) Avec ses valeurs, je n'obtiens pas toujours exactement ses résultats; 3) Qu'il ait obtenu une telle précision pour l'excentricité et pour la longitude du périhélie, cela tient du miracle.

En 1738, cent vingt ans après Kepler, Grandjean de Fouchy disait en effet: "*La longitude du périhélie de la Terre est connue à un ou peut-être deux degrés près*".

D'abord, une erreur minuscule sur les données se répercute beaucoup sur le résultat. Quand il faut résoudre un triangle dont un angle est inférieur à 5', une erreur de 0.5' sur cet angle affecte pas mal la longueur du côté opposé. Ensuite, et surtout, déterminer la longitude du périhélie de la Terre est très difficile car la Terre ne décrit pas une ellipse képlérienne autour du Soleil: c'est le centre de gravité du système Terre-Lune qui le fait. Le globe terrestre ne fait que suivre le mouvement. Voir l'article de M. Meeus dans "l'Astronomie" de janvier 2005, p. 39.

Les longitudes héliocentriques sont affectées de la précession, comme les géocentriques, car dans un cas comme dans l'autre, l'origine de ces longitudes est la direction du point  $\gamma$  (gamma), qui se déplace. Mais en effet, il aurait été plus logique que toutes les longitudes soient rapportées à un seul équinoxe, celui de 1583, ce que CH. H. Eyraud a parfaitement remarqué.

Si quelqu'un souhaite décrire la méthode de Kepler en s'appuyant sur cet article, je n'y vois aucun inconvénient, au contraire. Cet article, en réalité, il est de Kepler !

**Blaise SIMON**

■

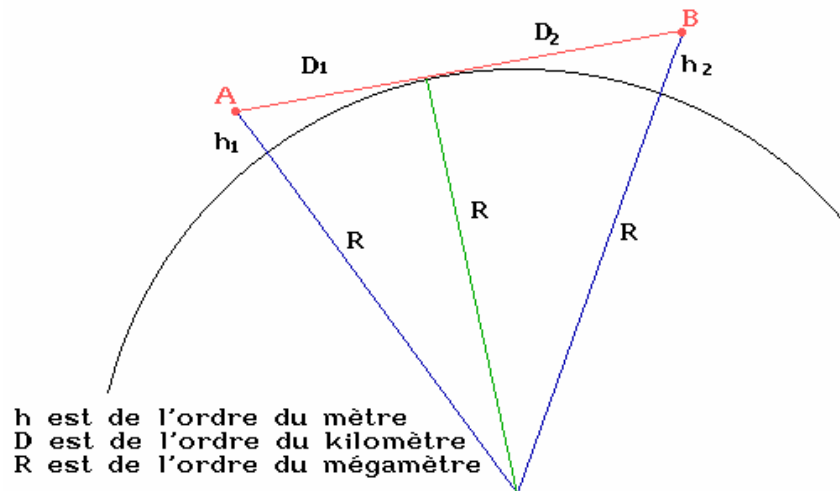
## Erratum

Les liens web des patrons du théodolite présenté CC117 ne sont malheureusement plus valides, pour cause de restructuration totale du site web de l'Observatoire de Lyon. Vous trouverez tous les documents utiles à l'adresse suivante :

[http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/cdroms/docu\\_astro/reperage/theodolite/theodolite.htm](http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/cdroms/docu_astro/reperage/theodolite/theodolite.htm)

Toutes nos excuses et bonne construction !

## Solution du remue-méninges



### A propos du phare du Planier

Voici un schéma qui fixe les données du problème :

A est la position de l'observateur, à l'altitude  $h_1$ .

B est la position d'un point à la limite théorique de visibilité pour A, située à l'altitude  $h_2$  et à la distance D de A.

$D = D_1 + D_2$  est la distance séparant les points A et B. R est le rayon de la Terre.

Pythagore permet d'écrire simplement :

$$(R + h_1)^2 = R^2 + D_1^2 \quad \text{et}$$

$$(R + h_2)^2 = R^2 + D_2^2$$

D'où :

$$R^2 + h_1^2 + 2 R h_1 = R^2 + D_1^2 \quad \text{et}$$

$$R^2 + h_2^2 + 2 R h_2 = R^2 + D_2^2$$

Et :

$$h_1^2 + 2 R h_1 = D_1^2 \quad \text{et}$$

$$h_2^2 + 2 R h_2 = D_2^2$$

Approximation légitime :

$R h_1$  est sensiblement 1000 fois plus grand que  $h_1^2$

que l'on pourra donc négliger !

(même chose pour  $h_2^2$  devant  $R h_2$ )

On en tire :

$$2 R h_1 = D_1^2 \quad \text{et}$$

$$2 R h_2 = D_2^2$$

$$\text{Ou encore : } D_1 = \sqrt{2 R h_1} \quad \text{et}$$

$$D_2 = \sqrt{2 R h_2}$$

$$\text{Donc : } D_1 + D_2 = \sqrt{2 R h_1} + \sqrt{2 R h_2} \quad \text{et}$$

$$\sqrt{2 R h_2} = D_1 + D_2 - \sqrt{2 R h_1}$$

Numériquement, avec :  $D = D_1 + D_2 = 45.10^3$  m,

$h_1 = 5$  m et  $R = 6,4 \cdot 10^6$  m

$$\sqrt{2 R h_2} = 45.10^3 - \sqrt{2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \cdot 5} = 37.10^3$$

$$h_2 = (37 \cdot 10^3)^2 / (2 \cdot 6,4 \cdot 10^6) = 107 \text{ m}$$

Le phare ne mesurant que **80 m** ... sans réfraction, il n'est pas visible.

Dans l'hypothèse la plus favorable, où on le verrait « entier », (c'est peut-être un peu surestimé !) c'est qu'il semble « soulevé » de  $107 + 80 = 187$  m.

Vue à 45 km de distance, une telle hauteur correspond à un angle de réfraction de  $4,1 \cdot 10^{-3}$  rad ou  $0,23^\circ$  ou encore  $14''$ .

La valeur de la réfraction atmosphérique astronomique étant de  $31''$ , mon hypothèse personnelle serait qu'un rayon provenant de plus loin (en l'occurrence d'une étoile située à l'infini) serait davantage courbé par son passage dans une plus grande longueur d'atmosphère...

**Francis Berthomieu**

Pour compléter le calcul de Francis on peut supposer que l'on voit une hauteur de phare comprise entre 0 et 80 m. J'ai trouvé dans le livre de A. Le Calvé "Cours d'astronomie nautique à l'usage des candidats aux examens de la Marine Marchande et des plaisanciers" (Éditions EM O-M, 17 rue Jacob 75006 Paris en 1978) tout un chapitre sur la réfraction... en particulier sur l'angle de réfraction terrestre entre deux points : chapitre IX, page 224 et suivantes, plus particulièrement le paragraphe 220 page 233).

Cet angle peut être considéré comme égal à  $kT$ , T étant l'angle au centre interceptant l'arc AB (dans mon cas  $44,5/6400$  rd) et k un coefficient dépendant de la température, de l'humidité, de la pression et de l'âge du capitaine. Une estimation : k varie de 0,04 à 0,15...

**Michel Paulhiac** ■

## Solution horizontale des mots croisés:

I : Maupertuis II : ER - Otello III : Gnomon - TNT. IV : Roi - Trou V : Paëlla - As VI : An - Œil - PM VII : rong - Gotha VIII : Su - Ionisés - IX : Erse - ES - Ré X : CEA - Il - Fer

### Articles à venir

La relation Période Luminosité Couleur des étoiles variables Céphéides. Les ondes gravitationnelles. Le chaos. La sismologie stellaire. Le Solarscope. Le quart de cercle de Lalande. Les finesses de la régression linéaire. L'étoile laser artificielle. L'orbilune. La nébuleuse du crabe. L'équation du temps. La nébuleuse du Crabe revisitée - Les Olympiades de physiques : Les nébuleuses ; Détection des astéroïdes ; La course du Soleil.

### Petit commentaire sur les articles à venir

Depuis longtemps nous avons admis l'idée de faire des articles accessibles à un plus grand nombre. Selon le vœu cher à Clairaut lui-même, il faut avancer graduellement, comme l'ont fait les "commençans" (sic). Le DVD qui vous est offert avec l'abonnement aux Cahiers Clairaut vous montrera le chemin parcouru depuis trente ans. Si une telle gradation est possible dans un livre achevé, elle est quasiment impossible dans une revue régulière, car les "commençans" se renouvellent sans cesse. Il faut donc constamment reparler des phénomènes simples.

La compréhension d'un phénomène passe d'abord par l'approche qualitative. La difficile mise en équations et l'approche quantitative de ce même phénomène ne doivent venir qu'après.

Faut-il renoncer dans notre revue à aborder les aspects plus difficiles et plus calculatoires ? Personnellement, je ne le pense pas, car il y a une certaine jubilation à poursuivre le cheminement jusqu'au bout, à comprendre un mécanisme compliqué, à retrouver une formule mathématique ou à approcher la valeur numérique d'une constante numérique bien connue. Cela nous donne au moins l'assurance d'être sur la trace d'une parfaite compréhension. Alors, que faire ?

Pour essayer de concilier ces deux approches, nous essayons aujourd'hui de panacher les articles simples ("Histoire", "Reportage"), à lire "dans un fauteuil", pour reprendre l'expression de notre ami Michel Cauchois, et les articles plus techniques ("Avec nos élèves", "Cours"), qui demandent de suivre les calculs un stylo à la main. Mais nous sommes tributaires des articles qui nous sont soumis et il n'est pas facile de solliciter les auteurs de manière programmée, car nous ne sommes jamais assurés d'avoir les articles en temps voulu. Il est parfois même difficile de trouver des auteurs sur des sujets qui nous ont été demandés.

Une solution serait de ne traiter dans les articles que de l'aspect qualitatif en donnant accès sur notre site Internet aux détails plus techniques. Est-ce la solution ? Ce n'est pas sûr. C'est à vous, lecteurs, de nous le dire.

Selon Pierre Causeret, il faut privilégier les articles sur l'enseignement et l'astronomie. Je partage son point de vue : il faut rester très proche de ce que les enseignants peuvent traiter en classe. Mais je crois qu'il faut aussi donner des éléments d'astrophysique, pour aller au-delà, ne serait-ce que pour répondre aux questions des élèves et éventuellement susciter l'intérêt pour un approfondissement d'un sujet. Là encore, la décision finale appartient au lecteur. N'hésitez pas à nous faire part de vos remarques.

GP

Nous remercions Émilie Wernli, Anne-Marie Paturol et Chantal Petit pour la relecture de ce Cahier.