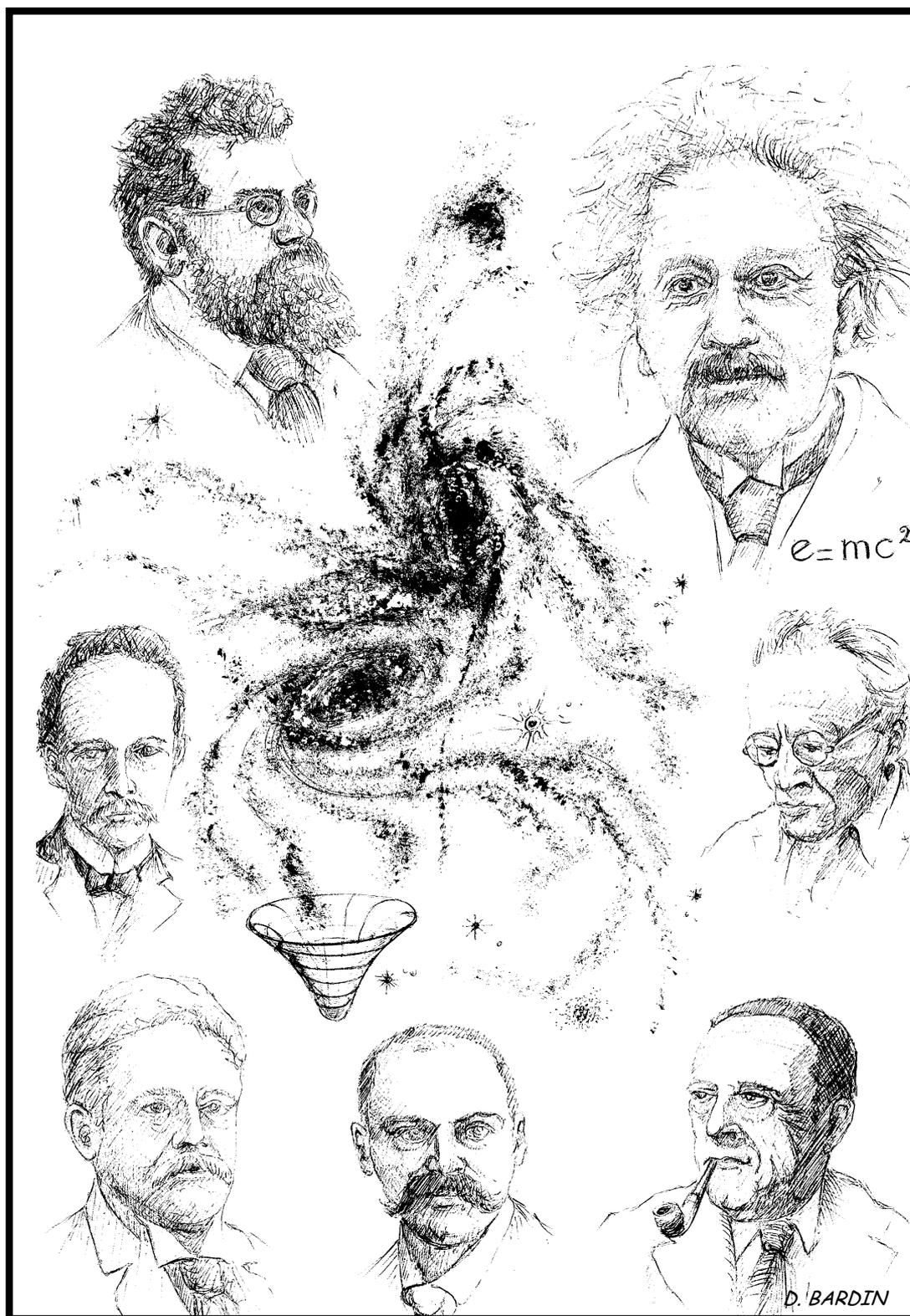


Les Cahiers Clairaut



numéro 110 - ETE 2005

Comité de liaison enseignants astronomes

Le CLEA

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (écoles d'été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école primaire, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés. L'adresse est la suivante : C-L-E-A@yahooouououes.fr.



Pour toute information s'adresser au siège du CLEA :

Laboratoire d'Astronomie, bât. 470

Université Paris Sud 91405 Orsay cedex

Tél./fax : 01 69 15 63 80

Adresse électronique :

CLEA : clea.astro@astro.u-psud.fr

Secrétaire : jean.a.ripert@wanadoo.fr

Le CLEA est présent sur internet à l'adresse :

<http://www.ac-nice.fr/clea>

Bureau du CLEA pour 2004

Présidents d'honneurs : Lucienne Gougouenheim,

Jean-Claude Pecker

Evry Schatzman

Gilbert Walusinski

Président : Georges Paturel

Trésorière : Béatrice Sandré

Trésorier Adjoint : Jacky Dupré

Rédacteur des Cahiers : Georges Paturel

Secrétaire : Jean Ripert

Secrétaire Adjointe : Cécile Ferrari

Responsable du site web : Francis Berthomieu

Rédacteurs Adjoints des Cahiers Clairaut

Daniel Bardin, Francis Berthomieu, Michel Bobin

Pierre Causeret, Frédéric Dahringer,

Charles-Henri Eyraud, Marie-Agnès Lahellec,

Christian Larcher, Chantal Petit, Jean Ripert,

Jean-Noël Terry, Daniel Toussaint

Associés de rédaction

Lucette Bottinelli, Jacky Dupré, Jean-Luc Fouquet,

Lucienne Gougouenheim, Colette Le Lay, Lucette Mayer

Philippe Merlin, Josée Sert

A PROPOS DE LA COUVERTURE

Deux galaxies entremêlées, en collision prochaine, sont distordues ; de plus, un "puit de gravitation", image relativiste bien connue, détourne quelques bras des spirales vers le bas. L'année 2005 célébrant l'essor de la physique en hommage à la publication du premier texte sur la Relativité en 1905, quelques portraits entourent le centre de l'image. Comme il était impossible de faire figurer "tous" les physiciens qui ont œuvré pour l'astronomie, il a fallu faire des choix. Qu'on veuille bien pardonner au dessinateur l'injustice de ces choix.

En partant d'Albert Einstein et en tournant dans le sens positif (à l'inverse des aiguilles des horloges), on trouve : Ludwig Boltzmann, Max Planck, Wilhelm Wien, Karl Schwarzschild, Edwin Powell Hubble, Erwin Schrödinger.

Daniel Bardin

Dessin de couverture : Daniel Bardin

Les Cahiers Clairaut

Été 2005 n° 110

EDITORIAL

Dans ce numéro nous poursuivons le dossier : "Année Mondiale de la Physique" en découvrant la mécanique quantique (ou ondulatoire) par la célèbre relation de Louis de Broglie associant une onde à toute masse en mouvement. Le cours élémentaire propose également la découverte de la mécanique quantique à travers l'étude des spectres lumineux.

Hasard de la mise en page, nous présentons également trois articles se rapportant à Mars. C'est une bonne occasion pour commencer l'observation de la rétrogradation apparente de la planète. Francis Berthomieu propose une campagne d'observation sur ce thème.

Un autre événement va avoir lieu à la fin de l'année: l'éclipse annulaire du Soleil. Pierre Causeret propose, une intéressante campagne pour exploiter ce phénomène et en déduire la distance de la Terre à la Lune.

La Rédaction
patu@obs.univ-lyon1.fr

Cours

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique
V I – Analyse de la lumière
G. Patuarel p. 2

Histoire

Lecture de Kepler - II
K. Mizar p.6

Avec nos Elèves

A propos de la période synodique d'une planète
C. Piguët p.9

Histoire

Autour du mot "Mars"-I
J.-L. Dewez, O. Dargent p.14

Avec nos Elèves

Rétrogradation de Mars et visibilité des planètes
B. Grauss et F. Billard p.16

Observations

Des activités pour l'éclipse de Soleil du 3 octobre 2005
P. Causeret p.21

Avec nos Elèves

Référentiels et mouvements de satellites
III - Application avec un tableur
P. Le Fur p.25

Dossier AMP 2005

Les parutions récentes pour l'AMP2005

C. Larcher p. 32

De Broglie et la nouvelle mécanique ondulatoire.

G. Patuarel p. 33

RUBRIQUES FIXES

p.38

- *Remue-méninges*
- *Lecture pour la Marquise*
- *La vie associative*

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique : VI- L'analyse de la lumière

Georges Patrel, Observatoire de Lyon

Résumé: Dans ce nouveau cours nous entrons dans le domaine de l'astrophysique. C'est par l'analyse de la lumière, la spectrographie, qu'a débuté l'aventure. Les physiciens furent confrontés assez tôt au phénomène nouveau des raies spectrales. Comment interpréter cet invraisemblable imbroglio de raies. C'est par une révolution dans les conceptions de la physique qu'a pu émerger la compréhension.

Introduction

Dans ce nouveau cours nous entrons réellement dans l'astrophysique, car nous allons pouvoir nous intéresser à la physique des astres et plus seulement à leurs positions. Mais comment étudier la physique d'un objet que l'on ne peut pas approcher ? C'est évidemment la lumière qui va nous permettre de réaliser ce que Auguste Comte croyait à jamais impossible. Il écrivait en effet que "... nos connaissances positives par rapport aux astres sont nécessairement limitées à leurs seuls phénomènes géométriques et mécaniques".

Comment extraire de la seule lumière une information aussi riche que la composition chimique d'une étoile, ou que les mouvements à sa surface ? C'est ce que nous allons commencer d'étudier.

Il nous faut encore parler de Newton

Nous avons vu quel rôle prépondérant a joué Newton dans l'établissement des lois de la mécanique. Ce savant génial ne s'en est pas tenu qu'à cet aspect de la physique. Il a étudié l'optique. Bon expérimentateur, il a su de manière géniale trouver des expériences qui prouvaient que la lumière "ordinaire" était une lumière "composée".

Sa première expérience a consisté à faire entrer la lumière du Soleil dans une pièce obscure par une petite ouverture pratiquée dans les volets. Ce fin pinceau lumineux était envoyé sur un coin de verre, ce qu'on appelle un prisme. La lumière blanche du Soleil se décomposait alors en une multitude de

couleurs, chacune d'elles sortant du prisme dans une direction différente (voir la figure 1). **La lumière blanche contenait donc plusieurs couleurs.** Mais Newton alla plus loin, il collecta ces rayons colorés avec une lentille convergente et envoya tous ces rayons sur un prisme similaire au premier mais inversé (Figure 1). A la sortie de ce deuxième prisme, les différents faisceaux colorés s'étaient recomposés en un seul rayon blanc, semblable au rayon solaire initial. **Plusieurs couleurs pouvaient se recomposer en un rayon blanc.** Newton montra que le nouveau rayon blanc pouvait à son tour se décomposer en divers faisceaux colorés.

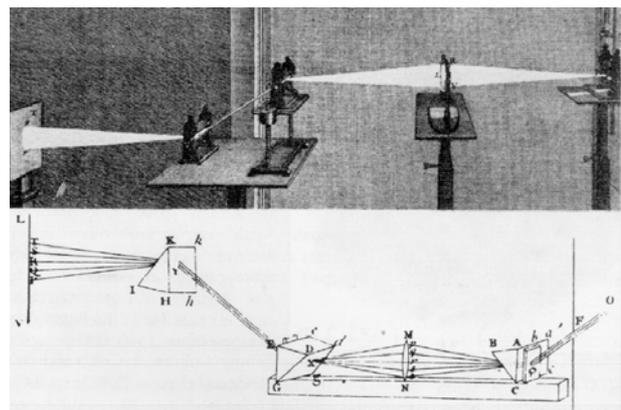


Figure 1 : Décomposition et recomposition de la lumière par l'expérience de Newton.

Une expérience géniale de simplicité

Un question se pose alors : combien de couleurs apparaissent lors de la décomposition de la lumière blanche ? Mon instituteur m'avait appris un mot

magique pour retenir ces couleurs : **VIBVJOR**. Nous avons ainsi les initiales des principales couleurs : Violet, Indigo, Bleu, Vert, Jaune, Orangé, Rouge.

On serait conduit à penser qu'il n'y a que sept couleurs fondamentales. En réalité, nous le verrons un peu plus loin, chaque couleur est caractérisée par une longueur, la longueur d'onde. Il y a autant de couleurs qu'il peut y avoir de longueurs, disons une infinité.

Néanmoins, les sept couleurs vues plus haut conduisent à une bonne représentation de la décomposition d'une lumière blanche, comme nous allons le voir. Newton imagina une expérience, merveilleuse de simplicité, pour montrer qu'une combinaison de couleurs pouvait produire du blanc. En dessinant sur un disque en carton des secteurs colorés chacun avec une des sept couleurs, nous allons pouvoir "faire" du blanc. Il suffit de faire tourner le disque à grande vitesse. Les sept couleurs se superposent à notre vue et nous voyons un disque blanc, ou plus exactement, blanchâtre, car nos sept couleurs ne sont qu'une pâle représentation du spectre complet.

Dans la rubrique "remue méninges", nous posons une question embarrassante à propos de la représentation des couleurs. En effet, si, sur le disque de Newton, nous ne faisons figurer que, par exemple, du jaune et du bleu, nous verrons une couleur verte. Bien ! Mais est-ce à dire que le mélange de deux longueurs d'onde (jaune et bleu) fabrique une troisième longueur d'onde (le vert) ? Si nous transposons cela à la musique, en jouant par exemple un do et mi entendrons nous un ré ? Je livre cette question piège à votre sagacité.

Une idée lumineuse

En 1802, quelques décennies après Newton, William Wollaston eut un jour une idée, a priori, curieuse. Il décomposa la lumière du Soleil avec un prisme, comme l'avait fait Newton, mais au lieu de prendre toute l'image du Soleil, il en isola une mince tranche avec une fente. Quel était son but ? On peut le comprendre : quand on prend toute l'image du Soleil, chaque point de l'ouverture d'entrée, va se décomposer dans les différentes couleurs. Aussi, dans une direction de sortie se mélangeront des rayons de différentes couleurs, entrés sous des angles différents. Il y aura un mélange des couleurs. Avec une fente très fine, il est possible d'éviter ce mélange. On doit avoir des couleurs plus nettes, et qui sait, voir séparément les couleurs qui composent le spectre du Soleil. La Figure 2 montre le schéma du principe de l'appareillage de Wollaston.

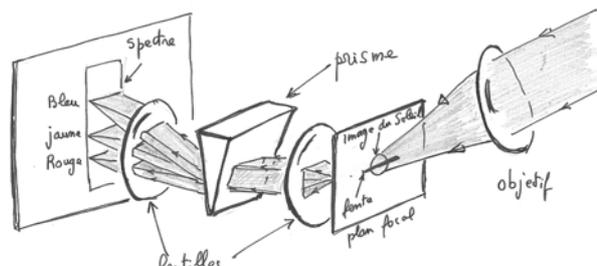


Figure 2 : Spectroscopie à fente

Wollaston ne réussit pas à dénombrer les couleurs qui semblaient toujours apparaître plus nombreuses, dans toutes les nuances "VIBVJOR". Mais il observa une chose étrange : sur le fond coloré se détachaient des lignes sombres, plus ou moins serrées et distribuées apparemment au hasard. Pourtant, ces raies occupaient des positions relatives fixes, toujours les mêmes, quel que soit le dispositif utilisé. Si on élargissait la fente d'entrée, les raies disparaissaient progressivement. Si on resserrait la fente, les raies, qu'on appellera désormais les raies spectrales, réapparaissaient à la même place.

Cette observation qui contenait en germe la nouvelle physique atomique, n'eut pas beaucoup d'écho, jusqu'à ce qu'un opticien allemand, Joseph von Fraunhofer refasse les mêmes observations. Il observa plus de trois cents raies spectrales et il désigna par des lettres les raies les plus intenses. Il observa en particulier ce que les astronomes appellent encore les raies "H" et "K" dans le bleu, le doublet "D", situé lui dans le jaune et bien d'autres. Mais la constatation la plus remarquable de Fraunhofer fut que le doublet "D" pouvait être observé simplement en faisant le spectre d'une flamme dans laquelle brûle du sodium (par exemple un flamme dans laquelle on place du sel ordinaire). Cette constatation montrait qu'il y avait un lien entre la position des raies spectrales et la nature du corps émetteur de lumière. On tenait peut-être la possibilité de connaître la composition des astres. Une révolution se préparait. Mais comment interpréter les positions de ces raies. C'est ce que nous allons découvrir bientôt.

Une description ondulatoire

Quand il fut admis que les raies spectrales représentaient la signature des corps émetteurs, les astronomes et les physiciens cherchèrent à déchiffrer le code donnant la position des raies spectrales.

Depuis Newton l'idée que les physiciens se faisaient de la lumière avait évolué. En effet, avec Newton la lumière était supposée faite de particules

de différentes couleurs. La propagation rectiligne ou la réflexion sur un miroir obéissent simplement aux lois de la mécanique newtonienne. Mais bientôt un phénomène bouleversa cette conception si simple : la découverte des interférences. Quand la lumière d'une source passe à travers deux petits trous (et se comportent comme deux sources indépendantes mais "synchronisées") l'image de ces deux sources donne des lignes alternativement claires et sombres (Figure 3). Ce phénomène est difficile, sinon impossible, à expliquer avec une conception corpusculaire de la lumière. Si en revanche on considère que la lumière est faite d'une onde qui vibre à une certaine fréquence, on explique très facilement le phénomène d'interférences. Si en un point de l'écran, les ondes issues des deux sources synchrones présentent un maximum, il y aura un maximum de lumière. Si, au contraire, l'une présente un maximum et l'autre un minimum, les deux ondes vont s'annuler, il n'y aura pas de lumière en ce point. L'étude géométrique de ce phénomène collait parfaitement avec les observations. La lumière devait être une onde.

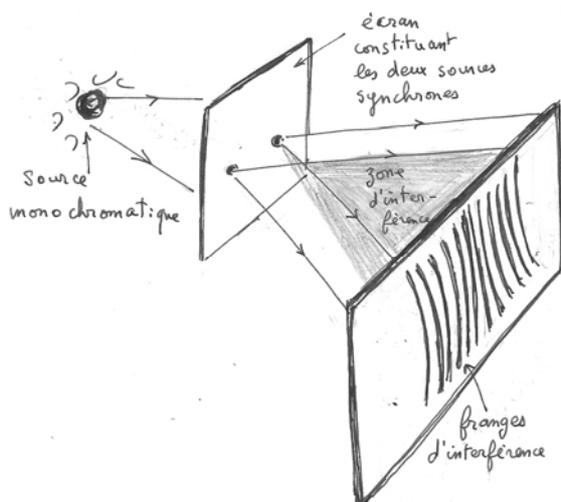


Figure 3 : Les interférences prouvent qu'à la lumière peut être associée une onde.

Il y eut pendant quelque temps une hésitation sur cette conception, car il fallait expliquer la propagation rectiligne de la lumière ainsi que la réflexion sur les miroirs. Mais le génial Augustin Fresnel, réussit à montrer mathématiquement qu'il n'y avait pas d'incompatibilité. La cause était entendue : la lumière était une onde¹ et mieux, à chaque couleur pouvait être associée une longueur d'onde. La longueur d'onde est très fréquemment

¹ Cette conception ondulatoire sera encore révisée plus tard grâce à une analyse d'Einstein sur laquelle nous reviendrons.

notée par la lettre grecque λ (lire lambda) équivalente à notre lettre L.

Interprétation empirique des spectres

En 1885, le physicien Balmer étudie les raies caractéristiques de l'hydrogène. Les quatre principales raies, que l'on désigne par $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, correspondent aux longueurs d'onde 656 nm, 486 nm, 434 nm et 410 nm (rappelons que le nanomètre noté nm, vaut un milliardième de mètre). Balmer montre qu'elles obéissent au principe de Ritz écrit sous la forme :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right);$$

Avec pour n, les valeurs entières, 3, 4, 5 et 6. Plus tard on a trouvé d'autres raies qui correspondaient aux entiers suivants. La constante R appelée la constante de Rydberg avait une valeur expérimentale connue.

L'atome d'hydrogène était un bon exemple à étudier. Mais comment interpréter l'arrivée de nombres entiers dans la physique. Était-ce un retour aux conceptions ancestrales des grecs ?

Nous allons voir que cette interprétation est arrivée par un chemin détourné, que nous allons emprunter.

Quantification pour la catastrophe UV

Les physiciens étudiaient le rayonnement d'un corps isotherme, appelé le corps noir. Un tel corps est *totalemment absorbant et totalemment émissif*. Expliquons un peu.

Une surface peinte en noir absorbe la chaleur. Pour vous en convaincre, placez en plein soleil, une plaque métallique peinte en blanc et une plaque identique peinte en noir. Vous constaterez que la plaque peinte en noir s'échauffe beaucoup plus vite. C'est la raison pour laquelle les capteurs solaires sont peints en noir. Si maintenant vous chauffez les deux plaques à la même température, et que vous les placez dans un endroit plus frais, vous constatez que la plaque noircie se refroidit plus vite. C'est la raison pour laquelle, les radiateurs de voiture, par exemple, sont peints en noir. Si les radiateurs d'appartement sont peints de couleur claire, ce n'est que par souci d'esthétique, mais c'est au détriment du rendement. Cette loi qui dit qu'un corps est d'autant plus émissif qu'il est absorbant est la loi de Kirchoff.

Plus précisément, les physiciens étudiaient le spectre d'un tel corps noir : à une température donnée, quelle pouvait en être le spectre.

L'application des lois de l'électrodynamique permettait de décrire correctement les grandes longueurs d'onde, mais pour les petites longueurs d'onde, l'ultraviolet, la relation prédisait une énergie infinie, ce qui n'était pas raisonnable. C'était un échec complet des lois du rayonnement. Une catastrophe, surtout dans l'ultraviolet.

Le physicien Max Planck fit une hypothèse hardie. Il postula que les échanges d'énergie lors d'un rayonnement à la fréquence ν (rappelons que la fréquence est reliée à la longueur d'onde par la relation $\nu=c/\lambda$, où c est la vitesse de la lumière) ne pouvaient se faire que par *quantités finies d'énergie* $E=h\nu$. (La constante h fut naturellement appelée la constante de Planck). Une hypothèse bien étrange, mais qui permettait de retrouver parfaitement le spectre expérimental (Figure 4). Planck hésita à faire cette hypothèse et il semble qu'il ait parfois douté de sa propre théorie. Pourtant cette idée neuve allait déboucher sur une nouvelle mécanique, la mécanique quantique. La relation de Planck permettait aussi de retrouver de manière indépendante le nombre réel d'atomes d'un corps par unité de masse moléculaire (par mole), ce qu'on appelle le nombre d'Avogadro. Ce résultat contribua aussi à valider l'hypothèse nouvelle qui, de surcroît, fut utilisée par Einstein pour interpréter l'émission d'électrons par un corps irradié (c'est l'effet photoélectrique découvert par Hertz). Bref, l'hypothèse fut acceptée et nous allons voir que Bohr en fit un usage intéressant pour le sujet qui nous occupe : l'émission de radiation par un atome.

Les spectres de corps noirs à différentes températures sont donnés à la figure 4. Plus le corps est chaud, plus sa densité spectrale est forte et plus son rayonnement est dominé par les courtes longueurs d'onde : plus un corps est chaud, plus il est "bleu". La position du maximum suit une loi simple :

$$\lambda_{\max_i} T = 0,02897 ,$$

où, λ_{\max_i} est la longueur d'onde du maximum exprimée en mètre et T est la température en Kelvin². Cette relation, dite relation de Wien sera très utile, comme nous le verrons plus tard.

En route vers la formule de Balmer

Grâce aux expériences de Rutherford, on savait que les atomes étaient faits essentiellement de vide. Les physiciens imaginaient l'atome comme un système planétaire : un noyau dense au centre figurant le

² Les Kelvins sont notés K. Ils correspondent à nos degrés Celsius habituels majorés de 273 degrés Celsius.

Soleil et des électrons gravitant autour comme des planètes. Dans ce modèle la force électrique remplaçait la force gravitationnelle mais les lois étaient assez semblables. Il sera montré que les trois lois de Kepler s'appliquent aux électrons orbitant autour du noyau. Surprenant !?

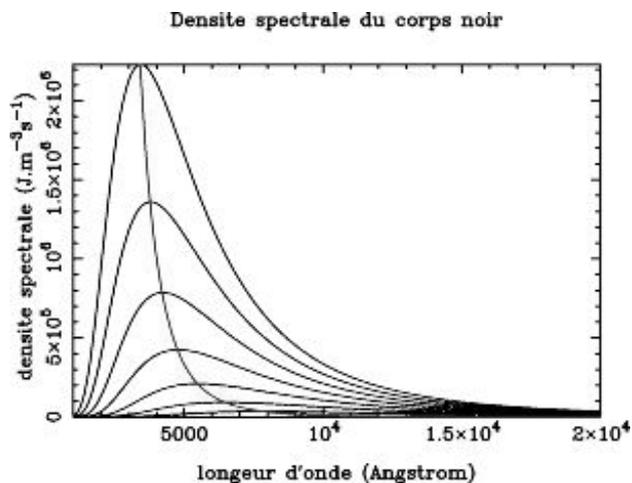


Figure 4 : densité spectrale de corps noirs entre 3000 K et 8500 K

Depuis Coulomb on connaissait la force qui s'exerce entre deux charges électriques, q , séparées par une distance r :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

On imagina alors que l'électron possédait une charge élémentaire e , négative, et le noyau une charge positive opposée e (positive).

Nous verrons dans le prochain cours, comment Bohr réussit en combinant l'idée de Planck, le modèle de Rutherford et l'expression de la force électrique, à retrouver de manière élémentaire la relation de Balmer pour l'atome d'hydrogène.

Fiat lux !

Un lecteur, Mr. Hugues de Sainte Foy, nous a signalé une "incorection" dans le précédent Cours. (CC109, page 2, colonne 2, premier paragraphe). J'avais écrit "... sa quantité de mouvement changeant proportionnellement à ... [la] force". La formulation était ambiguë. La force est égale à la variation de la quantité de mouvement par unité de temps. En effet, La définition de la force est $\mathbf{F}=\mathbf{dp}/dt$, où \mathbf{p} est le vecteur quantité de mouvement et où t est le temps. Notons que cette définition très générale de la force est valable aussi en mécanique relativiste. En mécanique de Newton, où la masse m est constante et où $\mathbf{p}=\mathbf{mv}$, on retrouve la fameuse loi fondamentale de la mécanique de Newton : $\mathbf{F}= m \mathbf{dv}/dt = m \mathbf{a}$, où \mathbf{a} est le vecteur accélération. Merci à ce lecteur attentif. **GP**

Lecture de Kepler - II

K. Mizar

Résumé : Lire ou plutôt relire Kepler, est-ce vraiment intéressant ? Le sujet n'est-il pas connu, analysé, exploré dans tous ses détails depuis les travaux entre autres, de Koyré (1) ou le livre captivant de Gérard Simon (2) ? On peut prétendre que non : il est toujours instructif de revenir sur les premiers pas de la science moderne, avec ceux qui lui donnèrent son élan, son style, sa manière de chercher, d'équilibrer théorie et observation ou expérience. C'est aussi à partir de ces premiers temps que s'institue le fructueux dialogue entre savants aux conceptions diverses ; confrontations qui font de l'histoire des sciences un patrimoine d'une extrême richesse. Tout comme celui des arts, patrimoine qui est bien celui de l'humanité toute entière.

Poursuivons¹ la lecture de la « Conversation avec le messenger céleste », cette confrontation amicale entre deux savants de tempéraments très différents, voire opposés à bien des égards, mais animés l'un et l'autre par un même amour de la science. Kepler a donc commencé par s'émerveiller sur l'invention de la lunette, non sans rappeler que dans son optique, les "Compléments à Vitellion" (que nous noterons CV), qui datent de 1604, il a donné les moyens d'en comprendre le fonctionnement. Nous savons bien l'étroite liaison entre progrès théoriques de l'optique et progrès de l'astronomie.

N'oublions pas que cette lettre, cette "Conversation" (notée ici CMC) fut écrite entre le 13 et le 19 avril 1610. Rappel essentiel car beaucoup de remarques nous surprendront par leur naïveté. "Comment Kepler a-t-il pu croire des choses pareilles !" aurions-nous tendance à nous dire". Il faut faire l'effort de se mettre à la place d'un homme du XVII^{ème} siècle qui lirait cette CMC pour la première fois... et qui ignorerait, bien sûr, plusieurs siècles de découvertes qui ont suivi. Telle est la leçon de l'histoire des sciences, retrouver la naïveté des anciens chercheurs, reconstruire la recherche astronomique dans toute sa fraîcheur. Condition requise pour apprécier la partie V de la "Conversation" où il va être question de la Lune.

¹Article, saisi par Jean Ripert et paru en 1983, dans le CC n° 23, p. 7 sous la plume de Gilbert Walusinski, alias K. Mizar.

Le terminateur

L'observation de la Lune occupe une place importante dans le "Sidereus Nuncius" (SN) de Galilée. Ce qui ne surprendra aucun amateur d'astronomie récent acquéreur d'un télescope, c'est le premier spectacle qu'il s'offre, c'est la première série de découvertes que Galilée présente.

Lorsque la Lune est en croissant, l'observation du terminateur, de la ligne qui sépare la partie éclairée de la partie sombre, est riche d'enseignements. Kepler, dans CV, avait prévu que le terminateur aurait exactement la forme d'une demi ellipse, la projection d'un demi-cercle. Or, Galilée a noté des irrégularités et il les interprète comme l'éclairage progressif du sol accidenté par le Soleil. Au lever du Soleil, les cimes des Apennins sont éclairées bien avant que les vallées ne reçoivent la lumière du Soleil, il en est de même sur la Lune dont le relief est ainsi mis en évidence. Ainsi s'exprime Galilée qui consacre à la question plusieurs pages du Sidereus et plusieurs dessins. Kepler approuve, mais semble beaucoup plus intéressé par les taches du disque lunaire.

Les taches de la Lune

Galilée distingue ce qu'il appelle les grandes et anciennes taches, déjà signalées par les anciens, des petites taches, des détails que la lunette lui a permis de découvrir (n'oublions pas que cette lunette grossissait douze fois et n'était pas exempte d'importantes aberrations chromatiques). C'est

l'interprétation de ces anciennes taches qui retient l'attention de Kepler.

Il se trouvait en opposition sur la question avec Plutarque. Pour celui-ci, les parties sombres représentaient des lacs ou des mers ; dans ses CV, Kepler proposait l'interprétation inverse, les "mers" selon lui, devant mieux diffuser ou réfléchir la lumière que les "continents". J'écris ici mers et continents entre guillemets, mais ni Kepler ni Galilée ne prennent cette précaution ; pour eux, il y a de telles ressemblances entre la Terre et la Lune que l'interprétation est assurée, celle de Plutarque à laquelle Kepler se rallie puisque l'observation du terminateur a mis en évidence le relief.

Pour les petites taches, Kepler est circonspect.

L'abondance des cirques le préoccupe. Considérant que sur la Lune la durée d'insolation est presque quinze de nos jours, il imagine que, pour les habitants, la chaleur est insupportable ; ils auraient donc construit de grands bâtiments entourant des régions plates où l'humidité serait mieux retenue pour leurs cultures et leurs pâturages placés ainsi à proximité de leurs résidences.

On est évidemment surpris par cette fringale imaginative. Car, même en 1610, il y avait de l'audace à supposer qu'un grand cirque comme Copernicus pouvait être la réalisation architecturale d'habitants supposés. La plus grande des pyramides d'Égypte ne représente qu'un petit tertre par rapport aux murailles de Copernicus. Mais l'imagination de Kepler est intarissable, il a encore une autre idée pour expliquer les plus petits cirques, le sol de la Lune a l'aspect de la pierre ponce matériau de faible densité et, justement, Kepler déduit de la vitesse de la Lune sur son orbite qu'elle est peu massive.

Ceci mérite une explication et nous amène à ouvrir une parenthèse dans la lecture de la "Conversation".

Dans ses remarques sur le mouvement de Mars, publiées en 1606, Kepler a déjà présenté ses idées sur la cause du mouvement des planètes. Idées qu'il reprend dans son "Astronomie nouvelle" (1609), III^{ème} partie, chapitre XXXIV intitulé "Le corps du Soleil est magnétique et est dirigé dans son champ de course" ; en bref, c'est la rotation du Soleil sur lui-même qui entraîne le mouvement des planètes autour de lui (et n'oublions pas qu'en écrivant cela, Kepler ne s'appuyait sur aucune observation attestant cette rotation du Soleil sur lui-même). Relisons-le :

"En outre cette opinion au sujet de la révolution du corps solaire (à savoir que celle-ci est la cause du mouvement des autres planètes) est confirmée par ce très bel exemple même de la Terre et de la Lune. En effet, parce que le mouvement principal et mensuel de la Lune, par la force des démonstrations

employées aux chap. I et XXXIII, est entièrement à partir de la Terre comme d'une source (en effet, parce que le Soleil est ici au reste des planètes comme la Terre est là pour la Lune dans cette démonstration), considère donc comment notre Terre apporte le mouvement à la Lune. C'est-à-dire, elle est emportée en roulant vingt-neuf fois et demie autour de son axe, en même temps que notre Terre et avec elle son apparence immatérielle ; cette apparence peut être à ce point jetée sur la Lune, afin que pendant ce temps elle la pousse une fois sur l'orbe, certes dans la même région où la Terre elle-même la précède".

Mais pendant ce temps, il est étonnant que le centre de la Lune parcourre une ligne plus longue du double, autour du centre de la Terre, dans le temps que l'on veut que quelque lieu placé au-dessous, sur la surface de la Terre, sur le cercle équatorial. Si, en effet, des espaces égaux étaient parcourus dans des temps égaux, il eut fallu que la Lune fut rétablie le soixantième jour, puisque la grandeur de son orbe est soixante fois plus grande que celle du globe terrestre.

Apparemment, une aussi grande force est à l'apparence immatérielle de la Terre, sans doute une grande légèreté et une faible opposition du corps lunaire... ("Astronomie nouvelle", traduction Peyrard, éd. Blanchard, p.225)

Nous admirerons la simplicité avec laquelle Kepler montre que la vitesse de la Lune sur son orbite est environ le double de la vitesse de rotation d'un point de l'équateur terrestre. Cinématiquement, Kepler voit juste. Dynamiquement c'est une autre affaire ; de sa vitesse tirer une conclusion sur sa densité nous surprendrait si nous ne savions pas qu'en 1610 Newton n'est pas encore né.

Le limbe

Galilée a été surpris d'observer le limbe éclairé de la Lune tout à fait circulaire alors qu'il venait de découvrir, par les ombres au voisinage du terminateur, l'importance du relief lunaire. Kepler approuve la double explication qu'il en donne et qu'il commente.

La première est appuyée sur une judicieuse comparaison. Lorsque la mer est impétueuse, pour un observateur placé sur le rivage, les crêtes des vagues semblent toutes sur un même plan, alors que pour un marin, dans sa barque soumise aux mouvements de la mer, il est très évident qu'entre les crêtes des vagues il y a des creux. De même, pour l'observateur terrestre, les montagnes de la Lune, sur le limbe, dessinent une ligne circulaire et les creux, les vallées n'apparaissent pas.

La seconde explication est plus surprenante. Kepler imagine que la Lune est enveloppée d'une manière transparente plus dense que l'air. Il appuie cette hypothèse sur une observation de son maître Mästlin qui, lors d'une éclipse de Lune observée depuis Tübingen en 1606 a vu une tache sombre sur le disque rougeâtre de la Lune éclipcée ; et Mästlin interprétait cette tache comme provenant d'un gros nuage de pluie sur la Lune.

Kepler ne dit rien, c'est assez surprenant, de l'observation de ce qu'on appelle aujourd'hui les "grains de Bailey" ; lors d'une éclipse annulaire de Soleil, le disque lunaire paraît effectivement moins exactement circulaire que le disait Kepler et des vallées lunaires laissent passer des "jours" de lumière, les grains de Bailey. On trouve, à la page 144 de l'édition 1955 de l'Astronomie populaire Flammarion deux superbes photos des deux éclipses "perlées" photographiées à deux saros d'intervalle les 1912.04.17 et 1948.05.09. Je disais "jours", Flammarion dit mieux "perles" ou "grains". Mais Kepler ne dit rien. Peut-être n'a-t-il jamais observé d'éclipse annulaire.

Quant à l'hypothèse de l'atmosphère lunaire, elle ressortit à des idées que Mästlin avait trouvées dans les commentaires d'Aristote par Averroès ce qui peut être à l'origine d'un contresens : pour Aristote, la Lune est une sorte de Soleil en second, un soleil de moindre qualité puisque de moindre éclat ; pour Averroès au contraire, la Lune est un double de la Terre. Mästlin et Kepler à sa suite retiennent cette dernière interprétation tout en l'attribuant à Aristote et cela leur permet d'admettre facilement l'hypothèse d'une atmosphère lunaire.

Cependant Kepler ne s'appuie pas sur l'existence de cette atmosphère pour justifier le fait que le diamètre de la partie éclairée de la Lune paraisse plus grand que celui de la partie sombre. C'est bien visible avant le premier quartier. Non, c'est une illusion optique, dit Kepler, relisez mes CV, p 217.

"Nous devons prendre garde à cette particularité de la vision qu'une chose brillante paraît proportionnellement plus grosse que la même chose

si elle était moins brillante. Ainsi, dans la première ou la dernière phase de la Lune, la corne brillante semble limitée par un cercle plus grand que le reste du corps éclairé par la lumière de la Terre et rendu ainsi clairement visible. Le même fait fut vérifié durant l'éclipse du 15/25 mai 1603 car certains observateurs purent voir le limbe de la partie dans l'ombre qui paraissait beaucoup plus petit que le cercle limitant la partie éclairée." (*)

En passant, Kepler fait remarquer que l'explication de la "lumière cendrée" donnée par Galilée dans le Sidereus, -un clair de Terre sur la Lune -, avait été donnée par Mästlin au moins vingt ans plus tôt. Ce qui ne nous étonne pas puisque, selon Flammarion, l'explication avait été donnée bien avant par Léonard de Vinci.

Pour cette fois, j'interromps ici cette lecture de la "Conversation". Tout ce qui concerne la Lune y représente dix pages imprimées. Il reste seize pages plus passionnantes sur l'observation des étoiles et la découverte des satellites de Jupiter, Si cela ne vous lasse pas trop, nous les relirons une prochaine fois.

K.Mizar

(*) Kepler donne deux dates pour l'éclipse de mai 1605, l'une dans le calendrier julien, l'autre dans le grégorien. La réforme selon les pays est en cours...

(**) Dans les indications bibliographiques données dans la première partie de cette lecture (CC n°25, pl0), j'ai omis de signaler un ouvrage essentiel et très accessible :

Quatrième centenaire de la naissance de Johannes Kepler colloque organisé par la SAF et le Centre Alexandre Koyré. Il reproduit les exposés de B.Morando, B.Taton, J.Kovalevsky, G.Simon, A.Hayli, P.-Costable, J.Lévy, P.Eusso et J.-C.Pecker. Une lecture de base pour toute étude de Kepler. Je suis reconnaissant à une lectrice attentive des Cahiers Clairaut, Mademoiselle S.Débarbat, de m'avoir signalé cette regrettable omission.

■

A propos de la période synodique d'une planète

Claude Piguet

Résumé : *Quand on étudie les mouvements des planètes, les lois fondamentales sont celles établies par Kepler au XVII^{ème} siècle. Tout naturellement on est alors amené à s'interroger sur la démarche suivie par Kepler pour établir la forme elliptique des trajectoires des planètes.*

Pour trouver la forme de la trajectoire de Mars, Kepler a utilisé la méthode de la triangulation (Figure ci-contre) qui consiste à viser la planète chaque fois qu'elle a fait un tour complet et se retrouve ainsi à la même position dans un repère héliocentrique. La Terre n'occupe pas alors la même place sur son orbite, ce qui permet de trouver la distance de la planète par la méthode des parallaxes.

L'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs d'une planète en un point de son orbite est appelé « période sidérale ». Mais comment peut-on connaître sa valeur quand on observe la planète depuis la Terre ? Dans tous les bons ouvrages traitant de l'astronomie, une définition et une relation semblent répondre à la question :

L'intervalle de temps que l'on peut observer entre deux passages successifs d'une planète dans une situation déterminée par rapport au Soleil et à la Terre, est appelé « période de révolution synodique » de la planète (pour Mars la valeur indiquée est de 779,94 jours)

Les périodes sidérale P et synodique τ de la planète sont liées à la période sidérale T de la

Terre par la relation :
$$\frac{1}{P} = \frac{1}{T} - \frac{1}{\tau}$$

Si l'on peut mesurer, par l'observation, la période synodique τ , on connaîtra alors la période sidérale P. Deux situations particulières peuvent être facilement identifiables par l'observateur : la conjonction et l'opposition de la planète avec le Soleil.

Il est quasiment impossible d'observer avec des élèves de tels phénomènes dans la réalité, mais heureusement il existe maintenant des logiciels qui reproduisent l'aspect du ciel et permettent de faire des mesures de positions d'étoiles ou de planètes comme si on était sous un beau ciel étoilé...

On peut ainsi les initier à une méthode d'observation avec relevés et mesures, certes virtuels, mais toutefois conformes aux faits qui se sont réellement produits.



Triangulation originale de "Astronomia nova"

Un logiciel de simulation des mouvements célestes permet de repérer facilement les instants où une planète est en opposition avec le Soleil. En effet au voisinage d'une opposition, la planète passe au méridien Sud (au-dessus de l'horizon) quand le Soleil se trouve dans le méridien Nord (en dessous de l'horizon) c'est-à-dire vers le minuit local.

Les deux dernières oppositions de Mars ont eu lieu le 15 juin 2001 et le 31 août 2003. Entre ces deux oppositions il s'est écoulé 807 jours. Ceci

devrait être la période synodique de Mars, d'après la définition ci-dessus énoncée. Or elle est différente de la valeur 779,94 jours indiquée dans les livres !

En recherchant les oppositions qui ont eu lieu au cours du dernier demi siècle, on obtient le tableau ci-dessous où figurent les dates ainsi que les constellations dans lesquelles l'observateur a vu la planète à ce moment là et l'intervalle de temps écoulé entre deux passages successifs :

<i>date des oppositions</i>	<i>constellations</i>	intervalle de temps
23 mars 1950	Vierge (début)	
1 ^{er} mai 1952	Balance	770 jours
24 juin 1954	Sagittaire	784 jours
10 septembre 1956	Verseau	809 jours
16 novembre 1958	Bélier-Taureau	797 jours
30 décembre 1960	Gémeaux	775 jours
4 février 1963	Cancer-Lion	766 jours
9 mars 1965	Lion	764 jours
15 avril 1967	Vierge	767 jours
31 mai 1969	Ophiucus	777 jours
10 août 1971	Capricorne	800 jours
25 octobre 1973	Poissons-Bélier	808 jours
15 décembre 1975	Taureau	782 jours
22 janvier 1978	Cancer	768 jours
25 février 1980	Lion	766 jours
31 mars 1982	Vierge	766 jours
11 mai 1984	Balance	772 jours
10 juillet 1986	Sagittaire	789 jours
28 septembre 1988	Poissons	811 jours
27 novembre 1990	Taureau	791 jours
7 janvier 1993	Gémeaux	772 jours
12 février 1995	Lion	765 jours
17 mars 1997	Vierge (début)	765 jours
24 avril 1999	Vierge (fin)	768 jours
13 juin 2001	Ophiucus	781 jours
28 août 2003	Verseau	806 jours

Une étude détaillée du tableau permet de prendre conscience des mouvements de Mars et de la Terre pendant ce demi siècle.

La Terre fait un tour autour du Soleil en un an et, d'année en année, retrouve la même position pour un jour donné du calendrier. Les dates permettent donc de déterminer, à chaque opposition, la position de la Terre sur son orbite.

Au moment d'une opposition la Terre, Mars et le Soleil sont alignés. A partir de la position de la Terre on connaît donc la direction de Mars.

On observe qu'à chaque opposition, la Terre et Mars n'occupent pas, sur leurs orbites respectives, les positions qu'elles avaient à l'opposition précédente. Entre deux oppositions successives, les deux planètes ne font donc pas un nombre entier de tours sur leurs orbites respectives

Première opposition après celle du 23 mars 1950

Le 23 mars 1950, le Soleil, la Terre et Mars sont alignés. L'observateur terrien voit Mars dans la direction de la constellation de la Vierge.

Le 1^{er} mai 1952, le Soleil, la Terre et Mars sont à nouveau alignés et l'observateur terrien voit la planète dans la direction de la constellation de la Balance. *Entre temps quel a été le déplacement de la Terre ?*

Du 23 mars 1950 au 23 mars 1952 la Terre a fait 2 tours. Du 23 mars 1952 au 1^{er} mai 1952 il s'est écoulé 39 jours pendant lesquels la Terre a avancé d'une fraction de tour équivalent à $39/365,25 = 0,11$ tour.

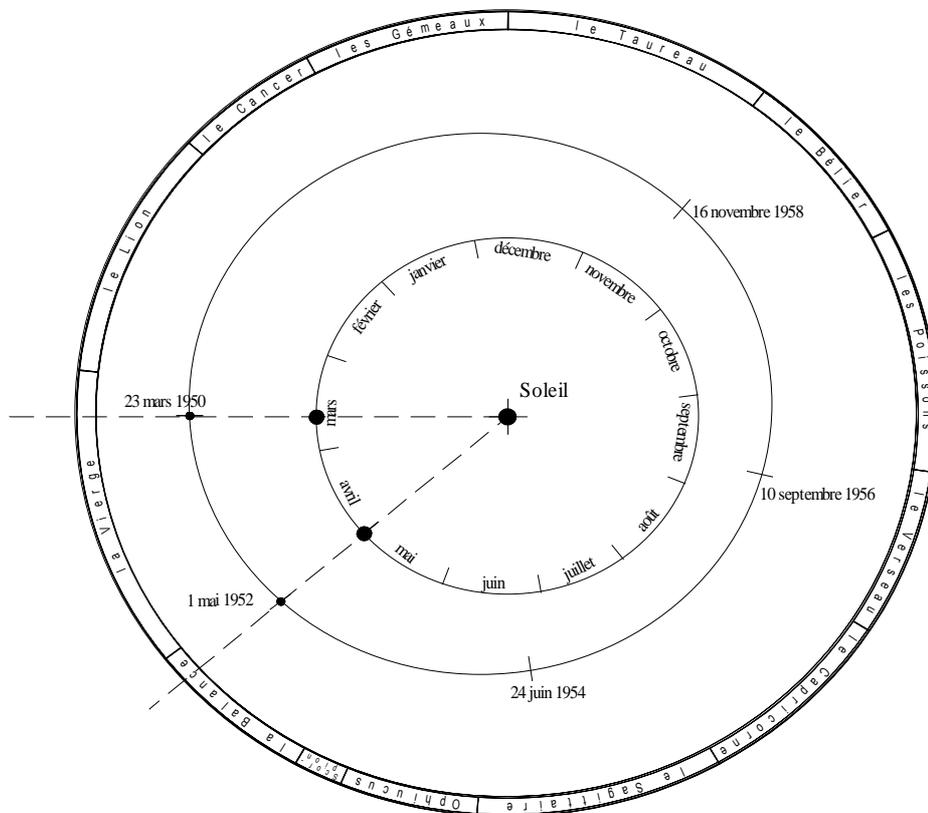
Au total la Terre a fait : $(2 + 0,11)$ tours = 2,11 tours. *Pendant ce temps-là combien de tours Mars a-t-il fait sur son orbite ?*

La fraction de tour qui est au-delà d'un nombre entier est la même que pour la Terre puisque Mars est à nouveau aligné avec le Soleil et la Terre. Mais Mars va moins vite que la Terre : il aura donc fait 1 tour de moins que celle-ci. Au total il aura donc fait : $2,11 - 1 = 1,11$ tours.

Les oppositions du 23 mars 1950 au 15 avril 1967

En raisonnant de la manière précédente pour les oppositions suivantes, on obtient le tableau ci-dessous où figurent les nombres de tours effectués par la Terre et par Mars d'une opposition à l'autre.

<i>date des oppositions</i>	<i>intervalle de temps</i>	<i>Nombre de tours effectués par la Terre</i>	<i>Fraction de tour au-delà d'un nombre entier</i>	Nombre de tours effectués par Mars
23 mars 1950				
1 ^{er} mai 1952	770 jours	2,11	0,11	1,11
24 juin 1954	784 jours	2,15	0,15	1,15
10 septembre 1956	809 jours	2,21	0,21	1,21
16 novembre 1958	797 jours	2,18	0,18	1,18
30 décembre 1960	775 jours	2,12	0,12	1,12
4 février 1963	766 jours	2,10	0,10	1,10
9 mars 1965	764 jours	2,09	0,09	1,09
15 avril 1967	767 jours	2,10	0,10	1,10



Entre les oppositions du 10 septembre 1956 et du 16 novembre 1958, la fraction de tour au-delà d'un nombre entier vaut 0,21 ; elle est beaucoup plus grande que celle observée entre le 4 février 1963 et le 9 mars 1965 où elle ne vaut que 0,09.

Vers les mois d'août et septembre, Mars a sa vitesse la plus grande sur son orbite car il est proche de son périhélie, là où il est le plus près du Soleil. La Terre met alors plus longtemps à rattraper la planète que lorsque l'opposition se produit au voisinage de l'aphélie.

Du 23 mars 1950 au 15 avril 1967, l'addition de toutes les fractions de tour répertoriées dans la 4^{ème} colonne du tableau donne 1,06. Elle correspond donc à environ 1 tour supplémentaire ce qui est en accord avec le fait que la Terre retrouve, à l'opposition du 15 avril 1967, une position voisine de celle qu'elle avait le 23 mars 1950 (les deux dates du calendrier étant proches) et, que Mars est à nouveau observé dans la constellation de la Vierge.

Entre le 23 mars 1950 et le 15 avril 1967, il s'est écoulé 17 ans et 22 jours soit **17,06** ans : La Terre a

donc effectué **17,06 tours**. Cette durée correspond à **8** intervalles d'oppositions et, comme entre chaque opposition Mars fait un tour de moins que la Terre,

Mars a fait $(17,06 - 8)$ tours = **9,06** tours en 17,06 ans soit 6 232 jours.

Avec ces valeurs on trouve que pour faire un tour sur son orbite, Mars met :

$$6\,232 / 9,06 = 687,86 \text{ jours}$$

L'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs d'une planète en un point de son orbite est sa « période sidérale ». C'est une grandeur constante dont la valeur est donnée dans les ouvrages relatifs aux planètes. La valeur indiquée pour Mars est de **686,980** jours.

La différence que l'on observe entre la valeur calculée ci-dessus et la valeur officielle peut s'expliquer par le fait qu'entre les deux oppositions du 15 avril 1967 et du 23 mars 1950 la Terre ainsi que Mars n'ont pas fait un nombre entier de tours. Le calcul effectué suppose en effet que pendant les 22

jours qui séparent le 23 mars du 15 avril la Terre et Mars se sont déplacées à vitesse constante ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Pour obtenir un meilleur résultat il faut trouver des oppositions se produisant à des dates du calendrier plus proches.

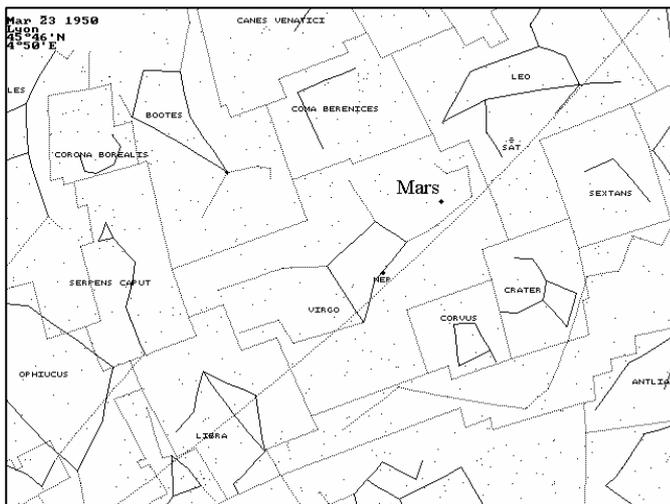
Les oppositions du 23 mars 1950 et du 17 mars 1997

Entre le 23 mars 1950 et le 17 mars 1997 il y a eu deux passages de Mars dans la constellation de la Vierge correspondant aux oppositions du 15 avril 1967 puis du 31 mars 1982.

A l'opposition du 17 mars 1997, la position de Mars est plus proche de celle du 23 mars 1950 qu'aux deux oppositions précédentes puisque la Terre n'est qu'à 6 jours de son passage au 23 mars.

Position de Mars parmi les étoiles

le 23 mars 1950



le 17 mars 1997



Entre le 23 mars 1950 et le 17 mars 1997, il s'est écoulé presque 47 ans, exactement **46,984 ans**, soit 17 161 jours pendant lesquels il y a eu **22 intervalles** d'oppositions.

La Terre a effectué alors 46,984 tours et Mars $(46,984 - 22) = 24,984$ tours en 17 161 jours, ce qui correspond à : **1 tour en 686,88 jours**. Cette valeur est plus proche de la valeur officielle que celle obtenue précédemment.

On obtiendrait certainement une meilleure précision en cherchant deux oppositions se produisant exactement à une même date de l'année. Ceci éliminerait les variations de vitesse de Mars sur son orbite, assez nettement elliptique, et

également celles de la Terre qui sont moindres mais existent cependant au cours de l'année. Sur une longue période d'autres perturbations agissent également les mouvements des planètes étant loin d'être stables.

Et maintenant que peut-on dire de la « période synodique » de Mars, dont la valeur officielle est de 779,94 jours et pour laquelle on a observé des valeurs comprises entre 764 et 811 jours ? On constate que :

- si l'on calcule la moyenne de tous les intervalles de temps entre deux opposition consécutives en divisant le nombre total de jours compris entre le 23 mars 1950 et le 28 août 2003, soit 19 516 jours, par le nombre total d'intervalles, soit 25, on obtient un intervalle moyen de 780,64 jours

- en appliquant la formule $\frac{1}{P} = \frac{1}{T} - \frac{1}{\tau}$ avec la valeur trouvée précédemment pour la période sidérale P, on trouve 780,04 jours, valeur très proche de la valeur officielle.

La « période synodique » indiquée dans les livres apparaît donc comme une moyenne ; ne faudrait-il pas l'indiquer clairement ?

Conclusion

L'analyse détaillée du phénomène des oppositions de Mars avec le Soleil montre que :

- sa « période synodique » *n'est pas périodique*,
- la valeur 780 jours, qui lui est généralement attribuée *n'a pas de réalité physique*,
- la relation $\frac{1}{P} = \frac{1}{T} - \frac{1}{\tau}$, qui la lie à sa période sidérale P et à la période sidérale T de la Terre, est « *extrêmement troublante* » puisque P et T ont des valeurs parfaitement déterminées et que τ a varié au cours du dernier demi siècle entre 764 et 811 jours !

La notion de « période synodique », telle qu'elle est habituellement présentée correspond à un

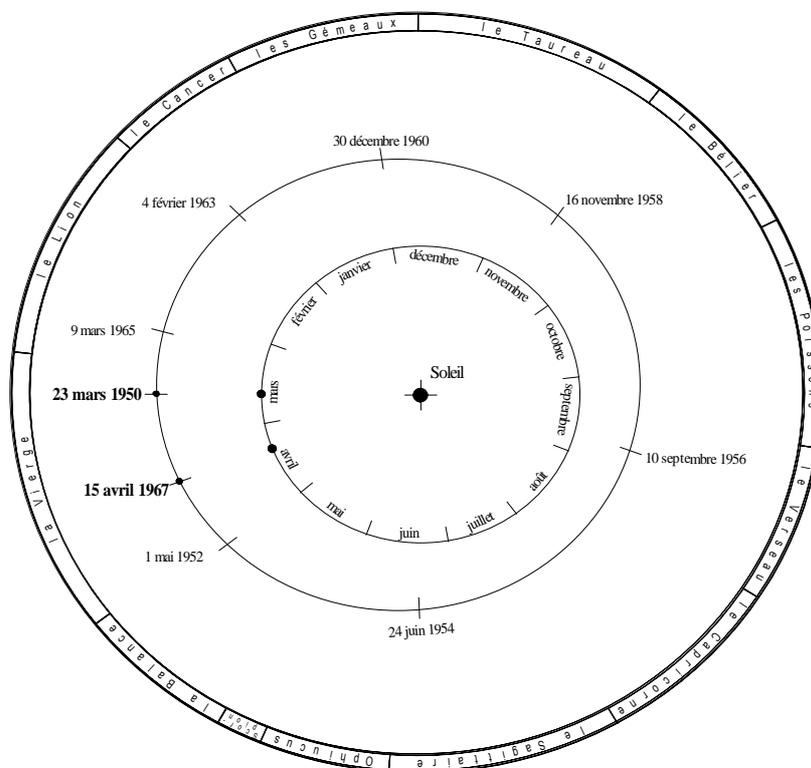
monde idéal où les planètes graviteraient sur des orbites circulaires centrées sur le Soleil.

La formule $\frac{1}{P} = \frac{1}{T} - \frac{1}{\tau}$ laisse croire que

l'on peut facilement connaître la période sidérale P en mesurant tout simplement l'intervalle de temps τ qui s'écoule entre deux oppositions consécutives, ce qui n'est pas le cas comme nous venons de le voir. Tout au contraire c'est à partir de la valeur de la période sidérale que la valeur de la « période synodique » vient d'être obtenue.

L'utilisation abusive de belles formules peut donc masquer une réalité beaucoup plus complexe que ne le laisse présager des théories présentées sans assez de discernement.

Apprendre à analyser un phénomène physique et à élaborer un raisonnement sans avoir recours systématiquement à une formulation mathématique, est sans nul doute plus enrichissant que d'apprendre en appliquant de savantes équations. Un autre avantage de cette démarche, loin d'être négligeable : éviter de décourager le néophyte et même parfois prévenir une interprétation erronée.



Autour du mot MARS

Jean-Luc Dewez¹ et Olivier Dargent²

Résumé : L'exploration de Mars a été marquée par une actualité scientifique intense et riche en ce début d'année 2004. L'arrivée de quatre sondes sur Mars (Opportunity, Spirit, Beagle 2 et Mars Express) a donné lieu à des découvertes scientifiques saisissantes, relayées par des articles dans les revues scientifiques et de vulgarisation. Les sites Internet comme ceux de la Nasa et de l'ESA sont riches d'informations et proposent, en direct, toutes les informations scientifiques récentes. Mais Mars : c'est aussi un mot, issu du fond culturel de l'antiquité romaine, un vocable et des usages, des dérivations, des variantes dont l'histoire et les traces actuelles révèlent des significations parfois complexes ou inattendues.

Dans ce premier article les auteurs examinent les origines du mot mars et l'héritage mythologique qui en a résulté. Les héritages symbolique et linguistique feront l'objet d'un second article.

Les origines

Mars dans la mythologie occidentale antique.

Qui fut nommé le premier ? Le dieu ou l'objet céleste ? Quoi qu'il en soit, comme dans d'autres cas semblables d'association d'un astre et d'un dieu, Mars a été une figure religieuse et symbolique, une représentation d'une des forces façonnant le monde. Dans son cas, cette force, c'est la guerre, ou plus exactement du combat en armes, et tout ce qui lui est associé : énergie, puissance, courage, mais aussi violence, voire cruauté, sang versé (une façon pré-scientifique d'expliquer pourquoi Mars est rouge ?). Historiquement, le nom dont nous avons hérité, que nous devons aux Romains, plus précisément aux Latins, dont un groupe fonda Rome, selon la légende, au cours du huitième siècle avant notre ère, a dû être précédé par le nom grec Arès. Les deux divinités ont été assimilées par la suite, mais présentent des différences très notables.

Tradition Grecque : un dieu secondaire et peu mis en valeur.

Les Grecs appelaient Arès la planète et le dieu (on retrouve la racine AR-S, qui peut désigner le feu, l'incendie dans le fonds indo-européen (par exemple dans notre mot *ardent*), donc encore une association possible avec la couleur rouge. Mais la racine peut aussi être AR-, avec les sens associés de arme, armement, et d'arété, vertu, courage). Fils de Zeus, il est aidé sur les champs

de bataille par sa fille (?) Éris (la Discorde), et deux de ses fils, Deimos et Phobos, l'Épouvante et la Terreur, dont les noms seront repris très à propos pour baptiser les deux petits satellites observés par l'Américain Asaph Hall en 1877. S'il incarne la fougue guerrière, Arès est aussi un dieu vantard, braillard, voire poltron ! Homère n'en fait pas un portrait flatteur dans l'*Iliade*. Il représente plus l'agitation guerrière violente et irréfléchie que l'art du combat (incarné par sa sœur et rivale, la sage Athéna, qui protège et inspire le héros à la bravoure intelligente, subtile : Ulysse). Arès est vaincu de façon humiliante (assommé par une pierre) par sa demi-sœur Athéna au cours d'un des combats de la guerre de Troie. Il est aussi blessé (au bas-ventre !) par la lance du héros achéen Diomède. Dans l'*Odyssée*, un récit rappelle comment il est ridiculisé par Héphestos, qui le prend – au filet ! – en flagrant délit d'adultère avec la déesse Aphrodite.

Son exploit le plus symbolique : un roi nommé Sisyphe avait réussi à capturer la Mort en personne. Personne ne mourait plus... Les dieux chargèrent Mars de la délivrer, et Sisyphe paya cher son outrage, puisqu'il devint un des damnés les plus célèbres des Enfers. Cette histoire est un bel exemple d'**allégorie** : rien de tel que la guerre pour redresser la courbe des décès !

L'héritage du nom grec dans notre langue et notre culture

- un **aréopage**, pour une assemblée prestigieuse de gens ayant à rendre un jugement, à prendre une

décision importante. Origine : Arès avait été jugé près d'Athènes par une assemblée des dieux pour avoir tué un garçon qui s'en était pris à une de ses filles ; il avait été acquitté. Attention, ce mot est souvent mal connu et déformé en *aéropage* par les cuistres !

- Le nom dont a été baptisée l'étoile rougeâtre **Antarès** se réfère à Mars : il signifie *rivale de Mars (anti-Arès)*.
- Le nom Arès a été retenu par la Nasa pour baptiser ses futurs gros lanceurs martiens. Stanley Kubrick l'avait déjà retenu pour baptiser l'engin qui dans 2001, l'Odyssée de l'Espace (1968), sert de navette entre la station spatiale en orbite autour de la Terre et la Lune.

Tradition Romaine : un dieu de premier plan

Le nom Mars n'est peut-être pas sans rapport avec le nom Arès (*m-ar(e)s*), mais semble surtout liée à une vieille racine latine ou étrusque (un dieu guerrier étrusque s'appelait *Mavors*) mas, mar-, qui traduisait surtout l'idée de masculinité : un peu comme pour les Grecs, Mars est aussi la représentation combinée de la jeunesse, de la virilité et d'une certaine violence. Mais surtout, Mars est plus qu'un dieu pour les Romains, c'est littéralement leur père fondateur, puisqu'il était selon la légende, le père de Romulus et Rémus. La légende veut aussi que ces derniers aient été par leur mère, Rhéa Silvia, des descendants directs du prince Énée et de la dynastie Troyenne, donc héritiers des valeureux guerriers aux côtés desquels Mars avait combattu sous les murs d'Ilium: Rome est ainsi la revanche de Troie, des combattants acharnés et qui n'acceptent pas la défaite, toute l'histoire romaine est fidèle à cette vision. Chez les Romains, Mars avait plus de temples que la plupart des dieux (aucun chez les Grecs n'était dédié à Arès) : l'importance de son culte témoigne de l'engagement guerrier permanent de cette civilisation. Comme pour les Grecs, le nom servait aussi à désigner la planète.

L'héritage mythologique

Les représentations classiques

Le dieu Mars n'a pas beaucoup inspiré les peintres et les sculpteurs, du moins hors l'époque romaine dont nous sont parvenues plusieurs statues. Pour le reste, on peut surtout citer un beau dessin de Raphaël, et des tableaux de Mantegna, Rubens, Velasquez.

Cinéma

Mars n'a jamais eu de grand rôles au cinéma (ni, antérieurement, en littérature, au théâtre ou dans des opéras). Il apparaît bien dans certains « péplums » italiens, mais il semble bien qu'il vaille mieux oublier ces exemples. Une exception toutefois pour une curiosité : dans *L'enlèvement des Sabines*, film franco-italien de Richard Pottier (1961), qui s'inspire de l'histoire de Romulus (interprété par Roger Moore, futur James Bond), le bref rôle du dieu Mars a été confié à l'acteur Jean Marais, habitué à l'époque des rôles de cape et d'épée et de ... Fantômas ! Ce qui avait ultérieurement permis à un commentateur du film le jeu de mots que vous pouvez deviner !

Musique

Pas question d'évoquer l'ensemble des musiques militaires, mais simplement un morceau célèbre, *Mars, the bringer of War : Mars, le messenger de la guerre*, de Gustav **Holst**, c'est le premier des sept thèmes d'une suite symphonique de Gustav Holst intitulé *Les Planètes*. Ce musicien anglais (1874 – 1934), professeur et compositeur, passionné d'astrologie, écrivit sa partition la plus célèbre en ... 1914 ! Il s'agit de l'allegro initial, consacré à Mars, Messenger de la Guerre : *sur un rythme percutant à 5/4, trois éléments dominent le morceau : sa constante pulsation rythmique, les interventions « par bouffées » des cordes, les appels et les réponses du tuba-ténor et des trompettes, qui créent un climat belliqueux* (M-R. Hofmann). L'inspiration mythologique est ici associée au symbolisme astrologique présenté dans le paragraphe qui suit.

Philosophie

Mars ou la guerre jugée, d'É-A. Chartier, dit Alain, publié en 1921. Ce professeur de philosophie, auteur de nombreux ouvrages encore célèbres, s'engagea volontairement comme simple soldat en 1914. Il reprit le nom du dieu pour le titre de cet ouvrage, non pour lui rendre hommage, mais pour le dénoncer, ce *dieu vaniteux, triste et méchant*, mais qui fascine et domine les hommes.

- (1) Jean-Luc DEWEZ, professeur de Lettres au lycée Marie Curie, Nogent-sur-Oise (60).
jldewez@wanadoo.fr
- (2) Olivier DARGENT, professeur de SVT (Sciences de la Vie et de la Terre) au lycée Marie Curie, Nogent-sur-Oise (60)
olivier.dargent@free.fr

Groupe d'étude SDTICE (Sous-Direction des Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation) Ministère de l'éducation Nationale (75).

■

AVEC NOS ELEVES

Rétrogradation de Mars et visibilité des planètes

Bernard Grauss - Francine Billard
Association d'Astronomie Eratosthène, Epernay
bernard.grauss@tiscali.fr

Résumé : L'ensemble a été réalisé en deux séquences de 1h30 avec des élèves de CM2. Après avoir observé le mouvement de rétrogradation de Mars à l'aide de diapos, les élèves ont essayé de retrouver ce mouvement à l'aide de rondes. La seconde séance a permis de retrouver les moments de visibilité des planètes. Ces expériences ont été faites à l'école élémentaire Marx Dormoy à Epernay (Marne), avec le concours de l'association d'astronomie Eratosthène (<http://perso.wanadoo.fr/ecole.dormoy/>)

Objectifs

Faire observer et faire comprendre le mouvement apparent rétrograde de Mars.

Prévoir les périodes de visibilité des planètes et leur phase à ces différentes époques.

"Prérequis"

A ce stade, les élèves ont déjà connaissance du système solaire ; ils connaissent les planètes et savent qu'elles tournent toutes, dans le même sens, autour du Soleil, dans des plans proches de l'écliptique (plan de révolution de la Terre autour du Soleil).

Calculs numériques, grandeurs proportionnelles, échelles.

Utilisation d'un compas, d'un rapporteur.

Intérêt du travail proposé

Montrer qu'un modèle est une représentation simplifiée de la réalité, et qu'un modèle est bon quand il est capable d'expliquer ce que l'on observe et permet de prévoir ce que l'on peut observer.

A/ Construction du modèle

Chaque élève dessine en bas d'une feuille A4 une partie du système solaire en utilisant les indications du tableau fourni, ci-dessous :

Distance moyenne Terre-Soleil = 1 ua (diamètre de représentation = 5 cm)
Distance moyenne Vénus-Soleil = 0,7 ua (diamètre de représentation = 3,5 cm)
Distance moyenne Mars-Soleil = 1,5 ua (diamètre de représentation = 7,5 cm)

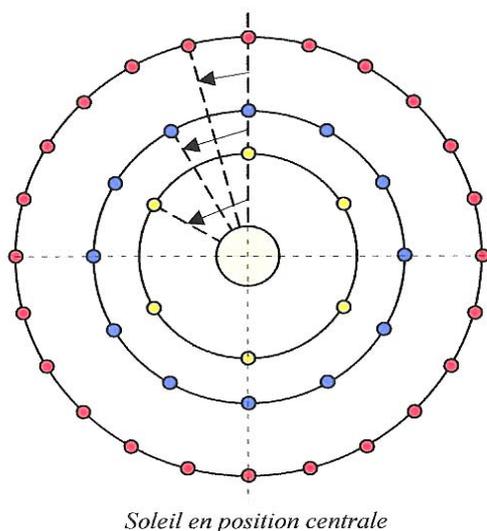
Période de révolution Vénus = 224 j
Période de révolution Terre = 365 j
Période de révolution Mars = 686 j

Déplacement mensuel de Vénus = $(360/224)30 = 48,21^\circ$ arrondi à 60° ⁽¹⁾
Déplacement mensuel de la Terre = $(360/365)30 = 29,58^\circ$ arrondi à 30°
Déplacement mensuel de Mars = $(360/686)30 = 15,74^\circ$ arrondi à 15°

(1) Ndlr : l'angle a été arrondi à 60° et non 50° pour simplifier

On peut remarquer que c'est bien un modèle que l'on construit puisqu'on admet que tous les astres sont dans le même plan, et que l'on utilise des valeurs approchées pour les longueurs et les angles.

Ce modèle sera ensuite tracé dans la cour avec une échelle 100 fois plus grande (mètre au lieu de centimètre).



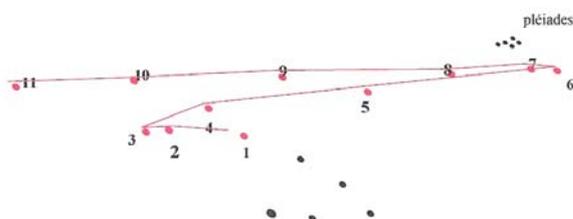
B/ Mouvement rétrograde de Mars

1. Visualisation du phénomène

Projeter les 11 diapos de la rétrogradation de Mars éditées par le CLEA.

Repérer sur un carton blanc les 11 positions de la planète par rapport à la constellation du Taureau.

Relier les points 1 à 11. Les élèves constatent le mouvement de va et vient de la planète.



2. Modélisation

Faire observer que toutes ces positions sont presque sur une même ligne droite que l'on trace. Les décalages par rapport à cette ligne droite sont dus au fait que Mars ne bouge pas exactement dans le plan de l'écliptique. Les positions observées sont réelles, le tracé de la droite correspond au modèle choisi : toutes les planètes dans le même plan.

3. Simulation du mouvement rétrograde

1/ Construire le modèle au sol, loin (environ 20 m) du mur qui sera le plan de projection des visées.

2/ Faire remarquer que plus la planète est proche du Soleil et plus elle circule vite sur son orbite. Ici on peut faire déplacer les enfants sur les 3 cercles, d'un « plot » mensuel à l'autre à chaque coup d'un gong. Tous les élèves pourront ainsi s'approprier le modèle.

3/ Expliquer le tracé de "la ronde des planètes" aux élèves.

Le fond du ciel étoilé est représenté par le bâtiment au fond de la cour.

La distance entre 2 points rouges représente le chemin parcouru par Mars en 1 mois.

La distance entre 2 points bleus représente le chemin parcouru par la Terre en 1 mois.

La distance entre 2 points jaunes représente le chemin parcouru par Vénus en 1 mois.

L'exercice consiste à placer un élève sur l'orbite de Mars et de la Terre, en commençant par M_1 et T_1 .

L'élève "Terre" devra situer l'élève "Mars" sur le fond de la cour.

Un élève muni d'un numéro 1 s'y placera.

"Terre" et "Mars" se déplaceront sur le point suivant, c'est à dire un mois plus tard, soit M_2 et T_2 .

Terre fera le même relevé qu'en position 1.

Un autre élève muni d'un numéro 2 s'y placera.

Le même exercice sera fait jusqu'à la position 7.

Ainsi 7 élèves, avec des numéros 1 à 7 seront en place devant le bâtiment.

On peut utiliser des groupes de 3 élèves faisant pour chaque mois, M, T et la projection avec le numéro.

On observe que la succession des numéros se fait en va et vient.

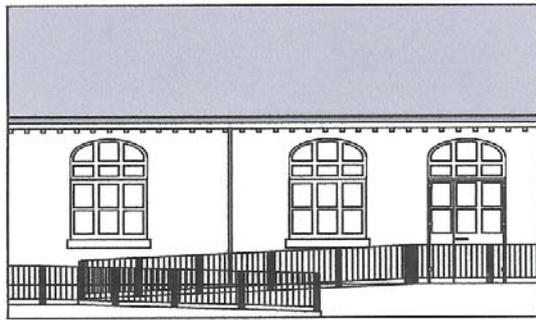
Attention, le dessin ci-après ne peut pas être juste puisque la distance est insuffisante entre le mur de l'école et le modèle au sol.

4/ Il sera demandé aux élèves d'en faire les relevés.

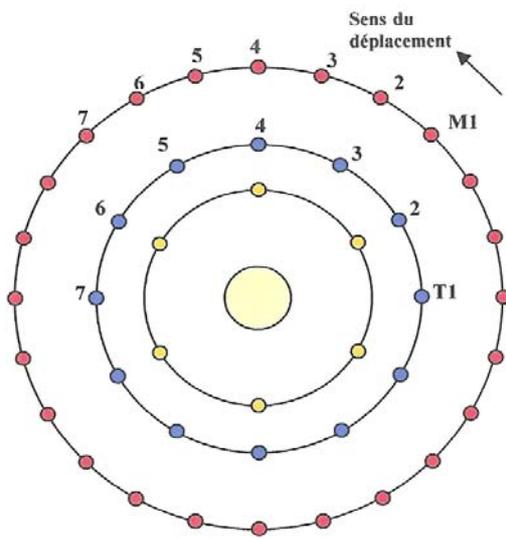
Ces différentes positions seront reportées sur des lignes A, B et C en mettant :

- sur la ligne A, les positions allant de droite vers la gauche,
- sur la ligne B celles qui vont de gauche à droite,
- sur la ligne C celles qui retournent de droite vers la gauche.

Puis, en joignant les points 1 à 7, on retrouvera un tracé ressemblant à celui de la trajectoire de Mars relevé à partir des diapositives.



7 3 2 4 6 5 1



C/ Visibilité des planètes

Le tracé de la ronde des planètes Vénus, Terre et Mars a été utilisé pour montrer que : les planètes intérieures (Vénus) ne sont visibles qu'en début et

fin de nuit et que leur aspect n'est pas « rond » : elles ont des phases.

les planètes extérieures (Mars) peuvent être visibles toute la nuit et sont « rondes ».

1/ Explications

Les planètes seront visibles s'il fait nuit. La succession du jour et de la nuit est due à la rotation de la Terre sur elle-même.

Les schémas ci-dessous permettent de voir comment cela se passe et seront reproductibles pour l'expérience que les enfants auront à mener.

Le point noir sur la Terre représente l'observateur, la ligne noire qui représente ses deux bras étendus, sépare ce qu'il voit devant lui de ce qu'il ne voit pas derrière lui (partie hachurée).

Pour l'observateur de l'hémisphère nord faisant face au Soleil, le bras droit indique l'Ouest et le bras gauche, l'Est.

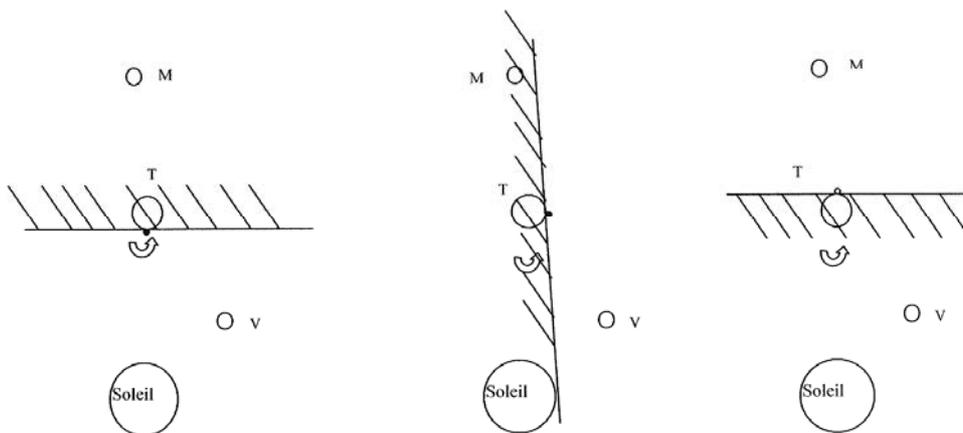
Sur le schéma ci-dessous (à gauche), il est midi pour l'observateur ; il ne peut pas voir Vénus, car il est ébloui par le Soleil.

Au cours de la journée, l'observateur va tourner avec la Terre dans le sens indiqué par la flèche.

A un moment (schéma du milieu) le Soleil va disparaître derrière la ligne noire : le Soleil se couche (à l'Ouest) et on peut voir Vénus sans être ébloui.

Un peu plus tard on pourra voir se lever Mars (à l'Est) et avec la position qu'on a choisie, on le verra durant toute la nuit.

Ce jour là, Vénus ne sera pas vue le matin, quand la Terre ayant encore tourné, le Soleil apparaîtra à nouveau (à l'Est) devant la ligne noire. (Vénus est soit astre du soir, soit astre du matin).



La partie hachurée figure la région sous l'horizon de l'observateur terrestre : à gauche, en pleine journée ; au milieu, le soir ; à droite, la nuit.

2/ Expérience menée

Trois élèves figureront les trois planètes: Vénus, Terre et Mars.

Placer un élève sur chaque point de départ représentant une planète.

Le départ se fera lorsque Vénus est dans la direction du Soleil (c'est à dire en conjonction avec le Soleil) et Mars à l'opposé par rapport à la Terre (c'est à dire en opposition).

Demander aux élèves simulant Vénus et Mars de toujours regarder le soleil (seule leur face sera éclairée, leur dos ainsi que leurs côtés seront dans l'ombre, donc non visibles de la Terre).

Faire tourner l'élève "Terre" dans le sens de rotation de la Terre (sens direct = inverse des aiguilles d'une montre) en étendant les bras et lui demander à quel moment de la nuit il voit Vénus et Mars et sous quel angle il les voit (de face, de profil ou de dos). En déduire quelle sera l'image de la planète (pleine, quartier...)

Faire une autre simulation avec d'autres élèves à la position Terre + "x" mois

Compléter le tableau donné au bas de la page.

Conclusion

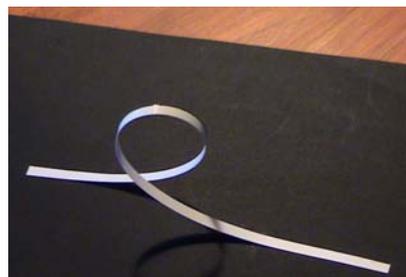
Le modèle construit permet de vérifier ce que l'on observe et de prévoir les possibilités d'observation des planètes. Il reste à le vérifier par des séances d'observation. Remarquons que les astronomes ont fait, eux, un travail inverse. Ils ont d'abord observé et on ensuite construit un modèle. Il a paru normal à la très grande majorité des astronomes de l'Antiquité de mettre la Terre au milieu de leur modèle (modèle géocentrique) et ils ont construit, notamment Ptolémée, un système qui fonctionnait très bien. Mais au cours des siècles, les observations devenant de plus en plus précises, il a fallu introduire des modifications de plus en plus compliquées au système géocentrique.

Copernic et Galilée puis Kepler et Newton ont peu à peu pu convaincre la communauté scientifique qu'un modèle héliocentrique (le Soleil au centre) était plus vraisemblable tout en décrivant plus simplement le mouvement des planètes.

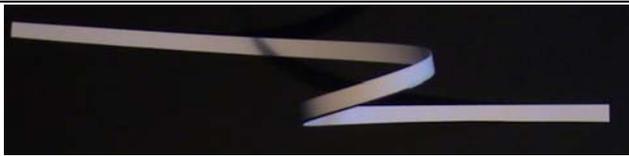
Placement des planètes	Vénus		Mars	
	Moment de visibilité	Image	Moment de visibilité	Image
<i>Au départ</i>	Invisible car devant le Soleil		Toute la nuit	
<i>1 mois plus tard</i>	Fin de nuit			
<i>3 mois plus tard</i>	Fin de nuit, début de matinée		.....
<i>6 mois plus tard</i>	.....	.....	Fin de soirée, début de nuit	
<i>9 mois plus tard</i>	.....	.....
<i>11 mois plus tard</i>	.....	.....
<i>12 mois plus tard</i>			Invisible, car derrière le Soleil	
<i>13 mois plus tard</i>			.....	.....
<i>20 mois plus tard</i>			.....	.....

Une maquette et plusieurs « boucles »

Afin de bien faire comprendre que la « boucle de rétrogradation » de la planète Mars peut prendre, selon les positions respectives de l'observateur terrestre et de l'orbite de Mars, de multiples apparences, tout en étant en fait presque toujours la même, un petit découpage sera d'une aide précieuse. On découpe une fine bande de papier que l'on colle sur un support noir, en lui faisant prendre la forme classique de la « boucle ».



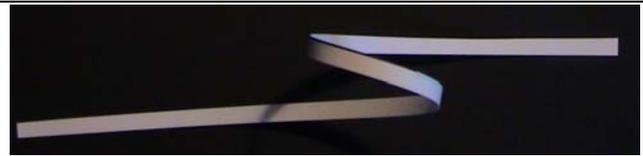
Il suffit ensuite à l'observateur de se déplacer pour voir ses divers aspects...



Un « Z » - rétrogradation de 1990-91



Une boucle « vers le haut » - rétrogradation 1992-93



Un « S » - rétrogradation de 2001



Une boucle « vers le bas » - rétrogradation de 2003

Francis Berthomieu

Opération « Photographions la rétrogradation de Mars »

Nous invitons tous nos adhérents à participer à cette opération : lorsque l'occasion se présentera, prenez une photo du ciel : la planète Mars devra bien sûr y figurer !

Pour plus de détails, en particulier sur le plan technique, consultez également notre site, à la rubrique « opération Mars 2005 ».

Datez exactement la prise de vue et envoyez nous votre document.

Si c'est un document « papier », par courrier à l'adresse suivante :

Francis Berthomieu

Place de l'église

83111 AMPUS

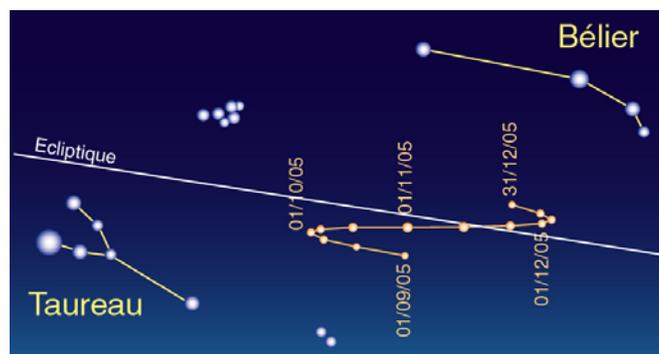
Si c'est une image numérique, envoyez là par mail à l'adresse suivante

berthomi@ac-nice.fr

L'ensemble des images recueillies sera mis en ligne sur notre site Internet : <http://www.ac-nice.fr/clea> et permettra la construction précise de la « boucle de rétrogradation de Mars pour 2005 ».

Erratum du CC109 page 23 :

Dans l'article sur les événements à observer en 2005, j'ai fait deux erreurs dans les dates. Il fallait lire 01/09/05, 01/10/05, **01/11/05**, **01/12/05** et 31/12/05. Désolé... Voici le dessin corrigé :



La rétrogradation de Mars à l'automne 2005 (dessin corrigé)

OBSERVATION

Des activités pour l'éclipse de Soleil du 3 octobre 2005

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Résumé : Le 3 octobre 2005, nous pourrons observer en France une éclipse partielle de Soleil. Ce sera l'occasion de parler du phénomène à nos élèves mais aussi de faire divers calculs avant, pendant et après l'éclipse, comme la mesure de la distance de la Lune. Toutes les heures indiquées ici sont en TU.

Le phénomène

Ce sera la deuxième éclipse partielle de ce siècle pour les observateurs situés en France métropolitaine, après celle du 31 mai 2003 au lever du Soleil. L'éclipse du lundi 3 octobre 2005 ne sera nulle part totale car la Lune sera trop éloignée pour cacher entièrement le Soleil. Les observateurs les mieux placés verront une éclipse annulaire. Ce sera le cas en Espagne (à Madrid ou Valence), en Algérie ou en Tunisie. L'heure donnée pour le maximum de l'éclipse est 10h31. Cela correspond au moment où l'angle centre de la Lune – centre de la Terre – centre du Soleil est minimal.



La zone de centralité traverse l'Espagne en passant par Madrid et Valence (carte extraite du site de l'IMCCE)

On trouvera tous les renseignements détaillés, horaires, carte de la zone centrale... sur le site de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (www.imcce.fr, choisir éphémérides, éclipses de Soleil, puis 3 octobre 2005). Toutes les données présentées ici proviennent de l'IMCCE.

L'éclipse en France

Pour un observateur situé en France, le maximum aura lieu entre 8h 57 en Bretagne et 9h 11 en Corse. Le pourcentage de Soleil éclipsé sera maximum au sud-ouest de la France (87 % à Pau) et minimum au nord-est (55% à Strasbourg). La durée de l'éclipse sera la plus longue au sud (2h49 à Ajaccio) et la plus courte au nord (2h31 à Lille).

Distances utiles

Le 3 octobre 2005 à 10h31 TU
Distance Terre Soleil : 149 700 000 km
Distance Terre Lune : 396 000 km
(données de centre à centre)

Le 3 octobre 2005 depuis Madrid à 8h58
(heure du maximum)
Distance de la Lune : 393 140 km
Distance du Soleil : 149 674 800 km

Le 3 octobre 2005 depuis Paris à 9h03
(heure du maximum)
Distance de la Lune : 393 270 km
Distance du Soleil : 149 674 500 km

Calculs à faire avant l'éclipse

On peut vérifier de différentes manières que l'éclipse du 3 octobre ne sera pas totale. Ces exercices sont inspirés de la fiche 4 (éclipses de Soleil) du hors série n°9 des Cahiers Clairaut.

Exercice n° 1 (facile, niveau 3^e)

Le 3 octobre 2005, la Lune passera entre le Soleil et la Terre.

a. À quelle distance devrait-elle être pour qu'elle cache exactement le Soleil ?

Données

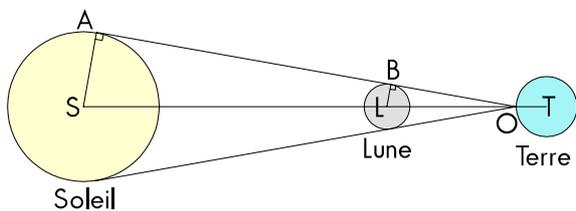
Distance Terre - Soleil : 149 700 000 km (ST)

Rayon du Soleil : 695 000 km (AS)

Rayon de la Terre : 6 370 km (OT)

Rayon de la Lune : 1 740 km (BL)

b. En réalité, elle passera à 396 100 km. Que peut-on en conclure ?



Solution :

a. $(AS)/(BL)$, ce qui permet d'utiliser le théorème de Thalès. On connaît AS, BL et $OS = ST - OT$, on trouve $OL \approx 375\,000$ km.

b. La Lune sera plus éloignée donc elle ne pourra pas cacher entièrement le Soleil.

Exercice n°2 (niveau 3^e, plus difficile)

Le 3 octobre 2005, la Lune passera entre le Soleil et la Terre. On veut calculer la position du sommet du cône d'ombre.

Les données

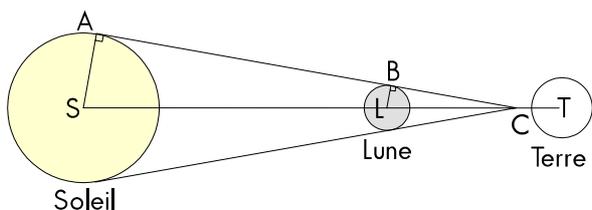
Distance Terre - Soleil : 149 700 000 km (ST)

Distance Terre - Lune : 396 100 km (LT)

Rayon du Soleil : 695 000 km (AS)

Rayon de la Terre : 6 370 km

Rayon de la Lune : 1 740 km (BL)



Solution

C'est encore le théorème de Thalès, mais il faut résoudre une équation pour arriver à la solution.

On connaît AS, BL et $LS = ST - LT$, on écrit :

$CL = x$. On obtient :

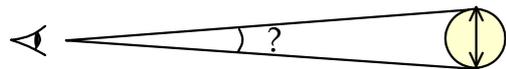
$$x/(x + LS) = BL/AS,$$

d'où $x \approx 375\,000$ km et $CT \approx 20\,000$ km.

On vérifie ainsi que le cône d'ombre n'atteint pas la Terre, il n'y aura pas d'éclipse totale vue du sol.

Exercice n°3 (à partir de la 6^e)

Une autre manière d'aborder le problème est de faire calculer le diamètre apparent du Soleil et de la Lune vus depuis la zone de centralité. On peut alors dessiner l'aspect du Soleil éclipsé.



Le diamètre apparent d'un astre est l'angle sous lequel on l'observe depuis la Terre.

Données :

Diamètre de la Lune : 3476 km

Diamètre du Soleil : 1 390 000 km

Distance depuis Madrid à 8h58 TU (heure du maximum) :

de la Lune : 393 140 km

du Soleil : 149 674 800 km

Solution

Les calculs peuvent être faits de différentes manières, avec de la trigonométrie ou des angles en radians par exemple.

Mais on peut aussi n'utiliser que des outils mathématiques niveau 6^e en assimilant le diamètre de l'astre à un arc de cercle centré sur l'observateur et en utilisant des proportions entre l'angle et la longueur de l'arc.

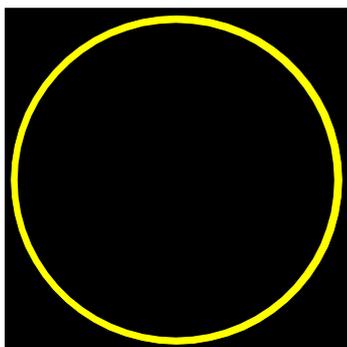
Pour la Lune, la longueur d'un cercle de rayon 393 140 km est d'environ 2 470 200 km.

On a donc 2 470 200 km pour un angle au centre de 360° et 3476 km (le diamètre de la Lune) pour un angle de $360 \times 3476 / 2\,470\,200$, ce qui donne 0,507°.

Pour le Soleil, on obtient :

$$360 \times 1\,390\,000 / (2 \times \pi \times 149\,674\,800) \text{ soit } 0,532^\circ.$$

On s'aperçoit clairement que le diamètre apparent du Soleil est supérieur à celui de la Lune.



L'éclipse à 8h58 à Madrid (Si vous regardez ce schéma à 5 mètres, vous aurez le bon diamètre apparent)

A faire pendant l'éclipse

Observer

Il faut toujours rappeler que l'on ne doit JAMAIS observer directement le Soleil, même partiellement éclipsé. Deux méthodes sont utilisables, l'observation par projection et l'observation derrière un filtre. On peut projeter l'image du Soleil sur une feuille blanche grâce à une lunette ou une paire de jumelles. C'est une méthode absolument sans danger pour l'œil à condition de toujours rester à proximité de l'instrument pour éviter qu'une personne ne mette l'œil à l'oculaire.

On peut aussi observer le Soleil à travers un filtre. De nombreux opticiens vendent des feuilles de mylar métallisé, testé pour ce genre d'observation. Le mylar ne doit être ni froissé ni plié pour être utilisable. Il faut rappeler que les filtres à visser sur l'oculaire souvent notés «filtre sun» sont à proscrire, toute la chaleur du Soleil entrant dans l'instrument, le filtre peut chauffer et se fendre.

Photographier

Avec les appareils photo numériques actuels, on peut arriver à faire des photos correctes à travers l'oculaire d'un télescope et en tenant son appareil à la main. Le mieux est évidemment d'acheter ou de bricoler un adaptateur. Les appareils de type reflex (argentiques ou numériques) placés au foyer de l'instrument donnent d'excellents résultats. Dans tous les cas, le filtre solaire est évidemment indispensable.

A faire après l'éclipse

Calculer le pourcentage du disque solaire éclipsé

Si vous avez pris une photo au moment du maximum, vous pourrez vous amuser à chercher le pourcentage du disque solaire éclipsé. Deux méthodes sont possibles :

La méthode du physicien : on reproduit sur une feuille la forme du croissant solaire. Sur un calque on trace des cercles de différents diamètres et on cherche celui qui se superpose le mieux au bord du Soleil. On découpe ensuite le disque Soleil et on le pèse sur une balance de précision. On enlève ensuite la partie éclipsée et on la pèse. Le rapport des masses donne immédiatement le pourcentage de soleil éclipsé.

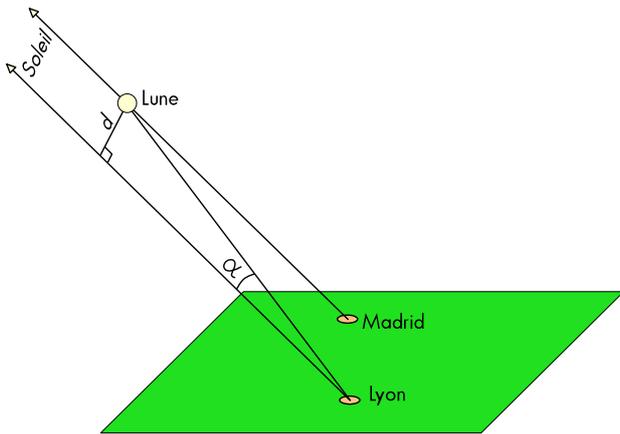
La méthode du mathématicien : en traçant des médiatrices de cordes, on retrouve les centres des disques Soleil et Lune. On calcule ensuite l'aire de la partie éclipsée en mesurant des angles au centre et en calculant des aires de secteurs de disques (proportionnelles à l'angle au centre) et des aires de triangles.

Mesurer la distance de la Lune

Pour ceux qui ont mesuré la distance du Soleil le 8 juin dernier, déterminer la distance de la Lune sera un jeu d'enfant. Les mesures et les calculs sont plus simples. Il faudra quand même procéder avec méthode si l'on veut obtenir des résultats acceptables.

Le principe de base est d'utiliser des observations faites à la même heure depuis deux lieux éloignés à la surface du globe. Mais on peut utiliser le fait que l'éclipse est centrale à Madrid à 9h08.

Il suffit alors de réaliser une photo du Soleil partiellement éclipsé à 9h08 depuis chez soi, tout en mesurant à la même heure la hauteur et l'azimut du Soleil. Le principal avantage de cette méthode est que l'on n'aura même pas besoin d'orienter notre photo pour comparer à l'image de Madrid où la Lune sera parfaitement centrée sur le Soleil. Dans tous les calculs, on considère le Soleil à l'infini. Cette approximation n'engendre pas une grosse erreur puisque l'on sait qu'il est 400 fois plus éloigné de nous que la Lune.



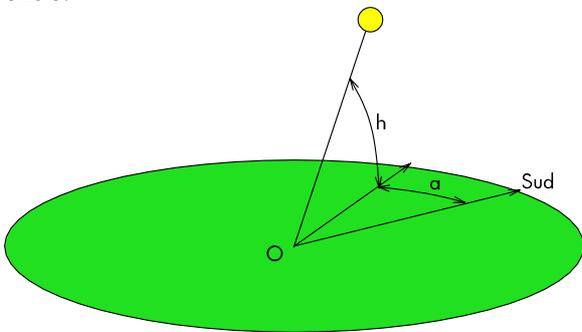
Principe de la mesure de la distance de la Lune à 8h58. Le Soleil est considéré à l'infini.

La méthode proposée

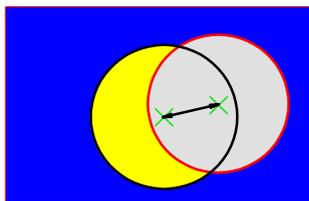
1. Prendre une photo de l'éclipse à 8h58 TU.



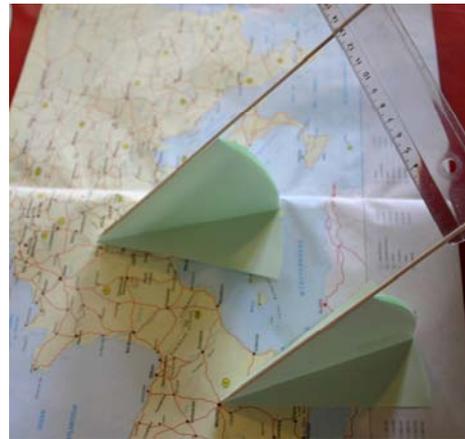
2. Mesurer la hauteur (h) et l'azimut (a) du Soleil à 8h58.



3. Sur la photo, repérer le centre du disque Soleil et le centre du disque Lune et mesurer leur écartement. Transformer cet écartement en angle sachant que le diamètre apparent de la Lune est de $0,5^\circ$. On a donc obtenu l'angle α .



4. Sur une carte d'Europe, repérer sa position et matérialiser la direction du Soleil à l'heure de la photo. Faire la même chose depuis Madrid (on supposera les deux directions parallèles, donc le Soleil à l'infini). Mesurer avec un double décimètre la distance entre ces deux parallèles. En déduire la distance réelle d en utilisant l'échelle de la carte (théoriquement, il serait préférable d'utiliser un globe terrestre mais si l'on est pas trop éloigné de Madrid, on peut négliger la rotondité de la Terre).



La distance d est mesurée sur une carte.

5. Calculer la distance de la Lune connaissant la distance d et l'angle α . On a le choix entre la trigonométrie, mettre l'angle en radian, ou assimiler la distance d à un arc de cercle.

Cette méthode devrait nous donner la distance de la Lune à moins de 10% près. J'espère que plusieurs équipes se lanceront dans l'aventure. Le site du CLEA pourrait collecter les différentes mesures et permettre un échange sur les méthodes utilisées par chacun (www.ac-nice.fr/clea).

■

AVEC NOS ELEVES

Référentiels et mouvement de satellites

III - Application avec un tableur

Pierre LeFur

Membre du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Professeur en MPSI à

L'Institut Supérieur d'Electronique et du Numérique de Toulon

place G. Pompidou 83000 Toulon

pierre.le-fur@isen.fr

Pierre.Le-Fur@wanadoo.fr

Résumé : Le problème des mouvements des satellites artificiels dans les référentiels géocentriques ou terrestres est abordé de manière progressive en utilisant des outils pédagogiques de complexité croissante : tout d'abord avec un bricolage sphère/carton, puis en utilisant un tableur illustrant une modélisation Képlérienne simplifiée, afin d'exploiter pleinement divers logiciels de simulation « clefs en main ».

Passages successifs de "ISS"

Décalages périodiques

Pour ISS, les données « two lines » sont par exemple :

$i = 51,6305^\circ$; nb de révolutions par jour : 15,66825, donc $T = 86400/\text{nombre de révolutions par jour} = 5514,33 \text{ s}$;

Injectés dans (R_1) , (R_9) puis (R_8) donnent : $d' = 0,182756^\circ$;

$A' = 360 (1-5514,33/86164) - 0,182756 = 336,78^\circ$. Déterminons Φ_n pour la première orbite sachant que le pas de tir est Cap Canaveral (CC) ; $\Phi_B = 80,6^\circ$ avec (R_{11}) donne $\Phi_n = 104,3^\circ$.

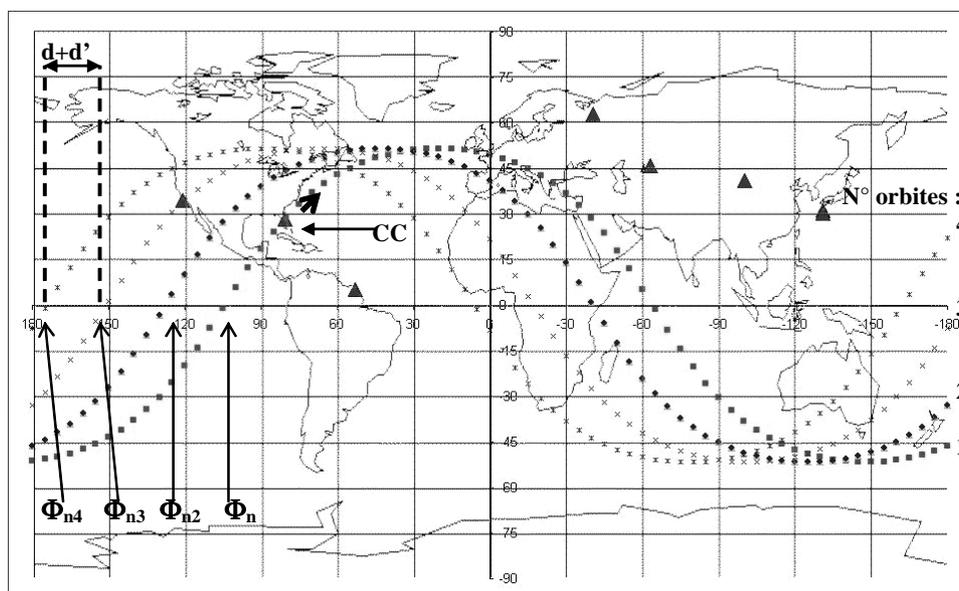


Fig. 4 : Traces des 4 premières orbites de l'ISS après le tir effectué depuis Cap Canaveral (CC). La flèche indique le sens du tir, avec une composante vers l'est. L'orbite n° 1 passe par CC. Seule la partie Est de cette orbite a une réalité physique. A la mise sur orbite ISS survole l'Europe. On observe l'augmentation $d+d'$ de la longitude Φ_n du nœud ascendant d'une orbite à l'autre. Résultats obtenus sur tableur « EXCEL ». Le fond de carte provient d'un site Internet [8].

Notons que $d+d' = 23,0393^\circ + 0,1828^\circ = 23,222^\circ$, représente le décalage en longitude ouest du nœud ascendant à chaque orbite, voir formules (R_2) , (R_{12}) .

Conditions de visibilité

En définissant une zone de survol autour du point d'observation, telle que le satellite apparaît à une hauteur h supérieure ou égale à 10° au dessus de l'horizon, appelée zone de visibilité, on peut étudier la « périodicité » des passages visibles en un point du globe. L'annexe 2 indique comment cette zone de visibilité est définie, puis tracée autour du point choisi.

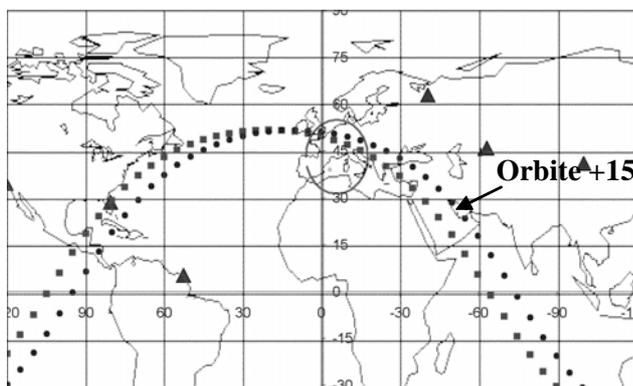


Fig. 5 : Traces des orbites +15 et +16, le lendemain d'un exemple de passage initial favorable. La zone de visibilité (hauteur 10°) est calculée pour un observateur à Toulon... On suppose ISS toujours éclairée par le soleil, mais l'observateur dans la nuit.

Sur un intervalle de temps raisonnable (quelques jours), donc un nombre d'orbites d'une centaine, l'altitude du satellite ISS peut

être considérée constante (voir site " www.heavens-above.com ", variation d'altitude). Dans ces conditions à partir d'un survol connu du lieu d'observation, cherchons l'orbite favorable suivante. Si le nœud ascendant se déplace de 360° on retrouve l'orbite favorable identique ; mais 360° correspond à un nombre d'orbites $n = 360^\circ / (d+d') = 15,50$. Ce qui correspond à environ un jour. Si ISS est bien visible un soir, il sera visible le lendemain 15 ou 16 orbites plus tard : 1jour moins 62 min ou 1jour plus 30 min, environ. Evidemment on a supposé que le soleil éclaire ISS. L'observation se fait en début de soirée ou en fin de nuit.

On remarque que les traces se décalent vers l'ouest dans la même soirée (+15 puis +16). Les directions d'observations changent. Sur cet exemple le passage +15 se fait nord-ouest vers nord-est, le passage +16 suivant se déroule ouest-nord-ouest vers sud-est.

On peut poursuivre la modélisation 48, 72, etc... heures plus tard et constater la sortie progressive des traces hors de zone de visibilité. On peut également visualiser le passage des périodes d'observation favorable du soir (début de nuit) au matin (fin de nuit)... Mais attention les paramètres d'éclairement du satellite et d'obscurité au lieu d'observation ne sont pas visualisés.

Les sites : "orbito", "Heavens Above", "nasa liftoff"...

Si l'on veut obtenir des visualisations complètes (traces, éclairement, zones jour-nuit) voire des positions en temps réel, de nombreux sites proposent leurs logiciels (téléchargeables ou non). Citons :

- <http://www.educnet.education.fr/orbito> [3]
- <http://www.heavens-above.com> [5]
- <http://www.science.nasa.gov/realtime/jtrack/> [6]

Si vous désirez obtenir la trace orbitale actualisée, en temps réel, avec le tableur, il faudra d'abord relier l'ascension droite (longitude céleste) du nœud ascendant Φ_n , à la date de référence des two lines, avec sa valeur de longitude terrestre Φ_n en utilisant l'heure

sidérale. Voir annexe 3. Ensuite calculer le nombre d'orbites effectuées depuis cette date de référence jusqu'à l'instant t et reprendre la méthode du II-1-a. La position en temps réel d'un satellite n'est accessible par cette méthode que pour des mouvements circulaires en utilisant le nombre de révolutions par jour et l'anomalie moyenne...

Pas de tir et inclinaison

Notre tableur va néanmoins nous permettre de bien maîtriser les différents paramètres orbitaux ; prenons l'exemple de l'inclinaison (on pourra s'intéresser à l'influence de l'altitude par la suite).

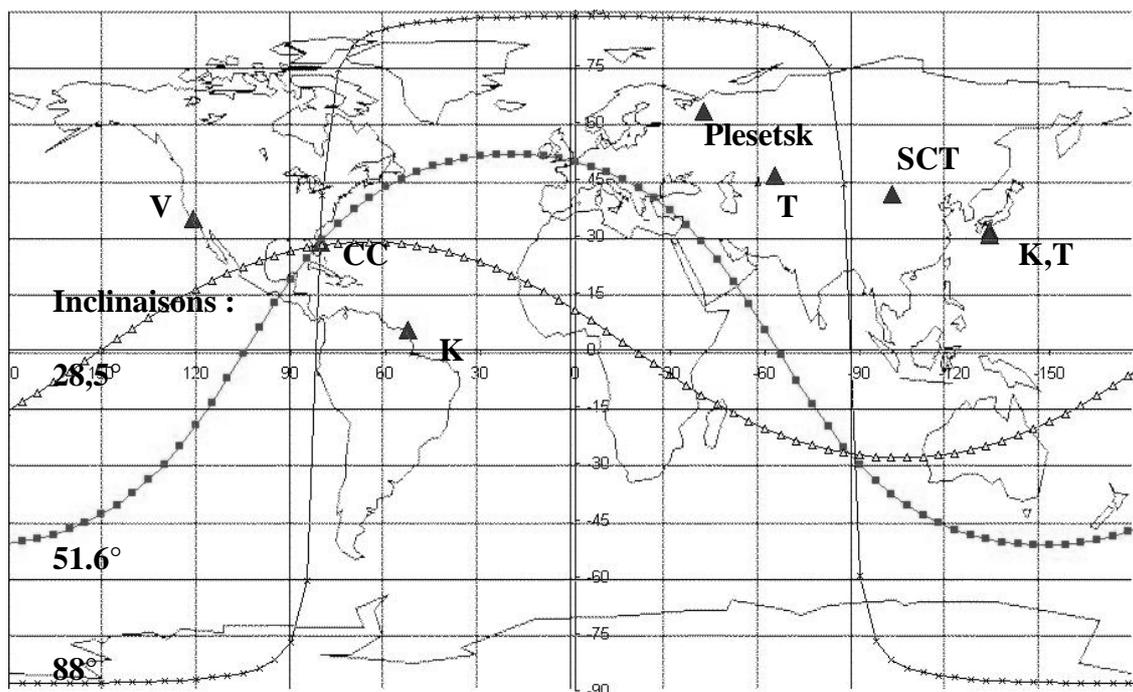


Fig.6 : Tirs depuis Cap Canaveral pour des inclinaisons différentes, à période -altitude- constante.

On passe d'une orbite quasi polaire (88°) par celle d'ISS ($51,6^\circ$) vers l'orbite d'inclinaison minimale ($28,5^\circ$, cas du Hubble Space Telescope) pour le site de lancement de Cap Canaveral.

En effet la relation (R_4) $i = \lambda_{\max}$ montre l'impossibilité d'avoir un tir direct à inclinaison plus faible que la latitude du lieu. Le site de Kourou apparaît immédiatement comme celui offrant la plus vaste gamme d'inclinaisons, en particulier les orbites les plus proches de l'équateur. ($i = 5,2^\circ$).

On remarque d'autre part que seul le site de Plesetsk (latitude $62,9^\circ$) ne permet pas d'accéder à ISS. Les stations spatiales (Mir, Skylab, ISS) ont donc toujours des inclinaisons de 50° environ pour être accessibles depuis plusieurs pas de tir. Que deviendrait la station spatiale internationale et ses occupants sans l'accès depuis Baïkonour ?

Autres visualisations

Les satellites héliosynchrones

Ces satellites « polaires » d'observation ont une inclinaison $i = 98,8^\circ$ une période de 6087,81 s soit une altitude de 828,1 km. Ces valeurs permettent d'obtenir une orbite héliosynchrone, c'est à dire que la direction soleil-Terre fait un angle constant avec le plan de l'orbite, ici $22,5^\circ$. La conséquence pratique est un passage à nœud descendant avec un éclairage du sol constant correspondant à une heure locale fixe (exemple 10h30 du matin) [6], favorable à une bonne observation « photographique ».

On utilise l'attraction du bourrelet équatorial terrestre ($d' < 0$, voir figure 3, précession vers l'est) pour faire pivoter le plan orbital – par rapport au référentiel géocentrique- d'un degré d'angle par jour environ. Traduisons cette propriété dans le référentiel terrestre :

$d' = -0,06842$ °/orbite, $d = 25,4353$ °/orbite, soit $d+d' \approx 25,3669$ °/orbite ou 360 ° par jour (solaire moyen de 24h). Le nœud ascendant se déplace donc par rapport au sol à la même vitesse que la limite jour/nuit : il décrit un tour de la Terre en 24 h.

On montre que ce satellite présente une répétitivité des traces au sol (ou points de survol identiques) de 26 jours soit 369 orbites exactement [1] [7]. En fait il existe une

répétitivité approchée tous les 5 jours environ soit 71 orbites plus exactement.

On remarque que le tir depuis Kourou a une composante de vitesse vers l'ouest, il est donc moins économique. En effet un tir à composante est, vers le sud-est, astreindrait à un survol du Brésil, inconcevable pour des raisons de sécurité.

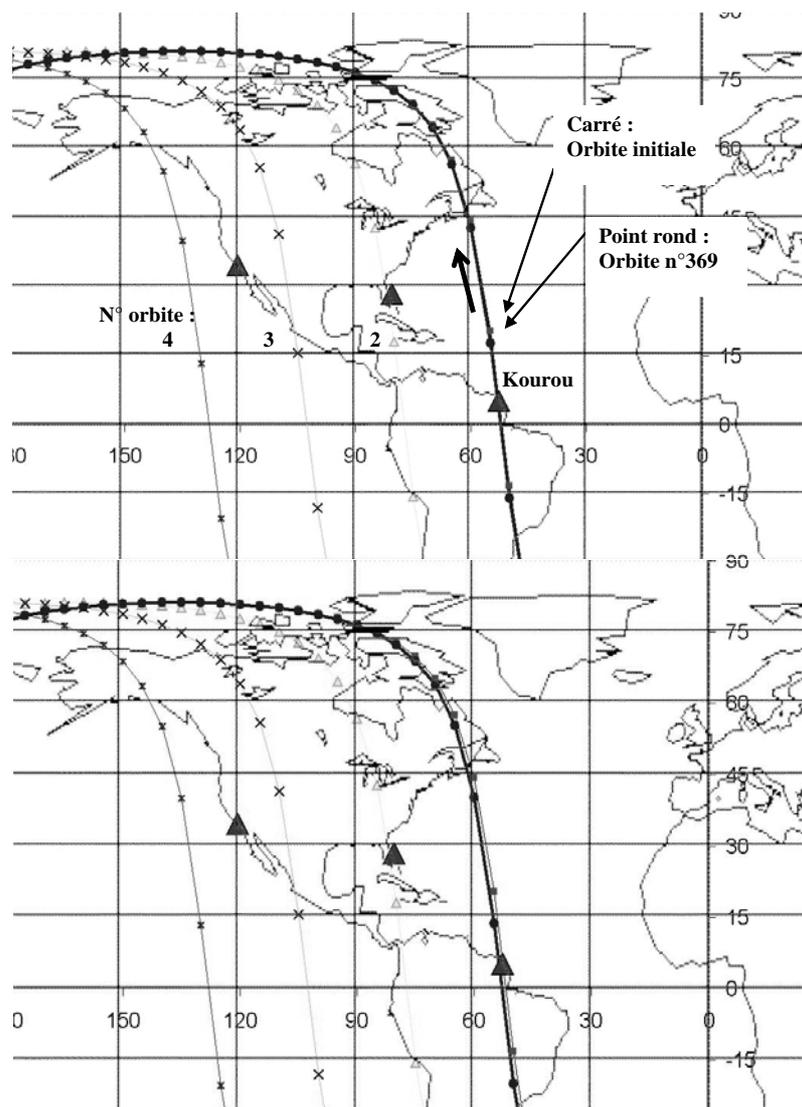


Fig. 7 : Traces des orbites du satellite Spot 4. En haut, mise en évidence de la répétitivité rigoureuse des traces après 369 orbites (26 jours) : superposition de la trace de l'orbite initiale et de la 369^{ème}, 26 jours plus tard. En bas, quasi répétitivité après 71 orbites (5 jours environ). Chaque passage (orbites 2, 3,4) au dessus du sol survolé se fait à heure locale fixe (22h 30-Spot 4 à Kourou). Près du nœud ascendant, seul visible ici, le passage se fait dans la nuit.

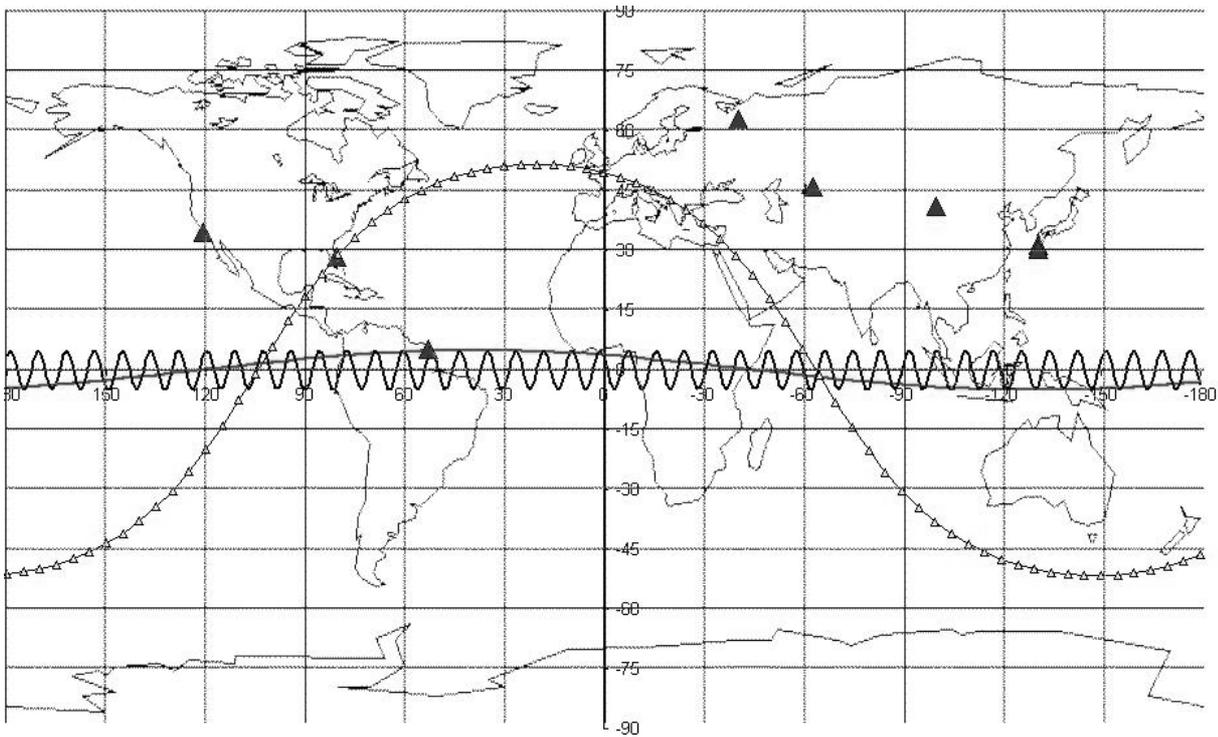


Fig. 8 : Traces au sol avec tableur « EXCEL »:

- 1) d'une orbite de référence, celle d'ISS depuis le Kennedy Space Center (Cap Canaveral) pour un demi grand axe $a=6770$ km ; $T = 5542$ s. La trace sur 360° de longitude correspond à une durée d'observation de 1h39 min.
- 2) d'une orbite d'un satellite de même altitude et période qu'ISS mais tiré depuis Kourou.
- 3) de N orbites d'un satellite de demi-grand axe $a=41500$ km ; $T = 84137$ s également tiré depuis Kourou. La dérive longitudinale de la trace d'une période A' (8.47°) montre que le satellite n'est pas exactement à la position géostationnaire. Ici, le nœud ascendant a décrit 360° en près de 41,4 jours (durée d'observation nécessaire pour observer la trace représentée sur la figure 7).

Les satellites géosynchrones

La modélisation par tableur permet bien sûr d'accéder à l'influence de l'altitude sur les traces au sol donc de la période T_0 du satellite. L'augmentation de l'altitude conduit à la réduction de la période apparente A' , voir figure 8, qui devient nulle pour le demi-grand axe $a \approx 42160$ km, soit $T_0 = 86164$ s. Le satellite est alors immobile par rapport au sol lorsque l'inclinaison de son orbite vaut exactement 0° .

Pour un satellite tel que : $\{i = \text{latitude de Kourou} = 5,2^\circ \text{ et } : T = T_0 = 86164\text{s}\}$, la période A' devient 0° : la trace sinusoïdale se réduit à un segment de droite perpendiculaire à l'équateur, compris entre les latitudes $\pm i$, dont la dérive en longitude est nulle.

S'il est d'inclinaison nulle on trouve le cas du satellite parfaitement géostationnaire. Le segment se réduit à un point.

En réalité pour une inclinaison non nulle, la trace au sol se présente sous la forme d'un 8 ou « analemme » [9]. Ce phénomène s'explique par la variation de la vitesse relative du satellite par rapport au sol en fonction de sa déclinaison ou latitude, au cours du temps. Voir la figure 9 extraite du site de la NASA.

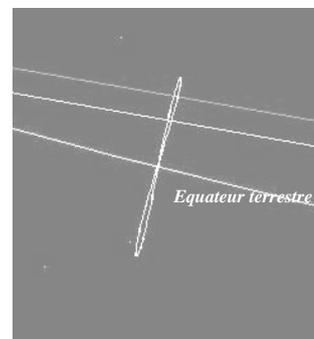


Fig. 9 : Traces au sol d'un satellite géostationnaire d'après « NASA Jtrack 3d » [6]. C'est Skynet 4C d'inclinaison $5,7^\circ$.

Conclusion

Le thème "référentiels et satellites" peut être abordé à des niveaux très différents, de la seconde aux classes post-baccalauréat. Les outils pédagogiques utilisés peuvent être adaptés à l'auditoire : du montage carton au tableur EXCEL en passant par les relations mathématiques. L'exemple du problème des satellites géostationnaires d'inclinaison imparfaitement nulle montre bien la relation outils/modélisations :

- Le modèle d'une trace orbitale se projetant d'une manière quasi ponctuelle sur le sol sera visualisé avec le montage carton-boule.
- Le modèle d'une trace orbitale se projetant suivant un segment perpendiculaire à l'équateur apparaîtra naturel avec l'approche tableur-approximation sinusoïdale.
- Le modèle réaliste d'une trace en forme de « 8 » s'imposera enfin à l'aide d'un logiciel complet de simulation de mouvements.

On remarque également que la progression dans les outils est nécessaire pour une maîtrise de la compréhension physique des phénomènes « observés ». En particulier, l'utilisation d'un tableur associé à une modélisation mathématique keplérienne ne permet d'accéder qu'à quelques aspects des trajectoires dans le référentiel terrestre, contrairement aux logiciels de simulation « clefs en main » ; mais elle me semble indispensable pour une approche certes simplifiée, mais en profondeur, de la physique mise en œuvre. Regarder fonctionner un logiciel, sorte de boîte noire, ne paraît pas suffisamment formateur.

Notons enfin que ces quelques lignes sont inspirées d'un travail de TIPE de classe MPSI [12], dans lequel les élèves n'ont pas hésité à utiliser la mathématisation minimale (R_{10}) présentée dans cet article, inspirée de la revue de vulgarisation « Science et Vie » [2]. N'ayons pas peur de l'outil mathématique, même dans le secondaire, pourvu qu'il ne cache pas l'essentiel : la compréhension « physique ».

Information importante

Si vous êtes intéressé par le thème astronomie, pensez à consulter le site du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes : www.ac-nice.fr/clea

Références

- [1] : « Satellite héliosynchrone », Pierre Bonnet, B.U.P n°707-octobre 1988 p 1073.
- [2] « La calculette de l'astronome », Pierre Kohler, Daniel Ferro, Science et Vie 1982, p 124.
- [3] « Lanceurs et orbitographie, Solstice », Jean Cassanet, B. U. P. n°846, p1293, juillet-août-septembre 2002.
- [4] « Astronomie par Internet », Guy Bouyrie, B.U.P. n°840-janvier 2002 p 90.
- [5] « Et pourtant ils tournent... », Pierre Le Fur, B.U.P. n°860-janvier 2004 p 79.
- [6] « Le TP NASA », Pierre Le Fur, B.U.P. n°860-octobre 2003 n°857 p 1341.
- [7] http://spot4.cnes.fr/spot4_fr/orbite.htm
- [8] <http://www.eleves.ens.fr:8080/home/ollivier/carto/carto3.html> (choisir projection quadratique).
- [9] « En suivant la lune... », Irène Tirapolsky, B.U.P.n°701-février 1988 p 222.
- [10] « ...l'équation du temps », Thierry Alhalel, B.U.P.n°838-novembre 2001 p 1559
- [11] « Mécanique spatiale : perturbations provoquées ou naturelles des systèmes képlériens », Colonel Robert Genty, B.U.P.n°852-mars 2003 p 387.
- [12] « Eurosat®, un logiciel de simulation du mouvement apparent des satellites artificiels », Pierre Le Fur, B.U.P. n° 801, p 378-379, février 1998.
- [13] <http://www.heavens-above.com/whattime.asp?> ou <http://www.users.skynet.be/zmn/cab/tech/temps/TempsSideral2.htm> ou <http://www.bdl.fr>
- [14] « Initiation à l'astronomie », Agnès Acker p 34, Masson 1982
- [15] Annuaire du bureau des longitudes (éphémérides 1990), p40, chez Masson, 1989.

Annexe 1

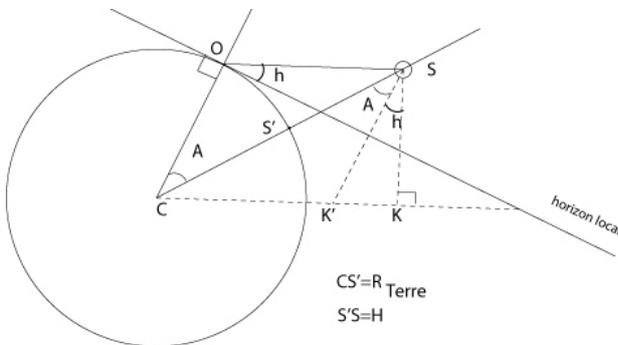
Coordonnées géographiques de quelques sites de lancement (cf. [2])

cosmodrome	symbole	latitude	longitude
Cap Canaveral	CC	28,5	80,6
Vandenberg	V	34,6	120,6
Plesetsk	P	62,9	-63,3
Tyuratam-Baïkonour	T	45,9	-40,7
kourou	K	5,2	52,7
Schuang Cheng Tsé	SCT	41	-100,3
Kagoshima	K	31,2	-131,1
Tanegashima	T	30,4	-131

Annexe 2

Zone géographique de visibilité d'un satellite éclairé par le soleil :

Un observateur O placé à la surface de la Terre aperçoit un satellite S d'altitude H au dessus du sol, si la hauteur d'observation h(°) au dessus de l'horizon est suffisante. Déterminons l'angle au centre OCS = A correspondant à cette situation :

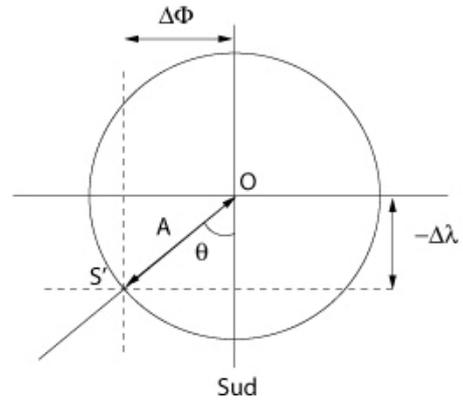


Dans le triangle CSK on a : $SK = (R_T + H) \cos(A+h)$

Dans le triangle SK'K on a : $SK = R_T \cos(h)$

D'où $\cos(A+h) = \cos(h)/(1+H/R_T)$

Connaissant ainsi l'angle au centre $A = OCS'$, on peut tracer le lieu des points S' , où le satellite peut être visible à cette hauteur h au dessus de l'horizon, à partir du point d'observation O.



Les coordonnées de S' dépendent de l'azimuth θ et de celle de O :

$$\Phi_{S'} = \Phi_O + \Delta\Phi \approx \Phi_O + A \sin\theta$$

$$\lambda_{S'} = \lambda_O + \Delta\lambda \approx \lambda_O - A \cos\theta$$

(Expressions valables si A petit –groupe de Gauss pour petits angles-[14])

En faisant varier θ de 0° à 360° on peut tracer le lieu des points S, sur la carte, c'est à dire la limite de la zone de visibilité.

Annexe 3

Ascension droite, longitude, temps sidéral (cf. : [10], [13], [14], [15])

Si TS_G est le temps sidéral à Greenwich à la date t, on a la relation :

$$\Phi_n(^{\circ}) = TS_G(^{\circ}) + \varphi_n(^{\circ})$$

Si t est la date de référence t_{ref} des « two lines », l'obtention de la longitude terrestre Φ_n est immédiate en utilisant la valeur de TS_G extraite d'un site Internet [13].

Si l'on dispose seulement de l'heure sidérale TS_G à une autre date t_0 , on peut obtenir TS_G à t_{ref} en utilisant :

$$TS_G(t_{ref}) = 1,0027379(t_{ref} - t_0) + TS_G(t_0)$$

On traduira les heures sidérales en ($^{\circ}$) à raison de 15° pour une heure sidérale ...

Les parutions récentes pour l'AMP2005

C. Larcher

Pour l'année 2005, nombre de livres et numéros spéciaux sur l'œuvre et la personnalité d'Albert Einstein sont apparus. La revue « **Ciel et Espace** » a publié un numéro hors série intitulé « Einstein l'homme qui a inventé l'Univers ».

Ce numéro, après bien d'autres, tente de rendre familières les notions de base sur la relativité en indiquant : « Les 10 notions clés de la relativité »

D'autres articles de cette revue s'intéressent aux questions épistémologiques essentielles dans un pareil sujet.

Je citerais l'article : « le cosmos avant Einstein » (P29) de Michel Paty qui cite les pionniers de l'histoire du début et de la fin de l'Univers

Je note aussi que la géométrie semble toujours inspirer les chercheurs. On sait que Johannes Kepler (1751-1630) avait découvert les lois qui portent à présent son nom en partant des « solides parfaits de Platon »

Il pensait que l'Univers ne pouvait être construit que d'une manière parfaitement mathématique. A l'époque les mathématiques les plus parfaites concernaient la géométrie. Pythagore et Platon admettaient qu'il existe dans la nature cinq et seulement cinq polyèdres réguliers convexes: " Les solides parfaits". Ce sont des solides dont toutes les faces sont "identiques" :

1. Le tétraèdre (pyramide régulière) délimité par quatre triangles équilatéraux
2. Le cube (6 faces carrées identiques)
3. L'octaèdre (8 triangles équilatéraux identiques)
4. Le dodécaèdre (12 pentagones réguliers identiques)
5. L'isocaèdre (20 triangles équilatéraux identiques)

En emboîtant tous ces solides les uns dans les autres et en intercalant à chaque fois les fameuses "sphères cristallines" il pouvait en déduire la position des 6 planètes connues (visibles à l'oeil nu)

et du coup expliquer pourquoi il n'y en avait que 6.....

Or dans l'article « L'Univers n'est-il qu'une idée ? » (P 76) J.-P. Luminet propose un modèle d'espace « dodécaédrique » reprenant une hypothèse qu'il avait formulée dans un numéro de la revue « Nature » le 9 octobre 2003.

Un autre article intitulé « Les monstres de la cosmologie » (88) de Roman Ikonicoff laisse assez rêveur sur l'imagination des chercheurs.

Les étudiants en Mai 68 proclamaient « l'imagination est au pouvoir » rappelle Thibault Damour (membre de l'Académie des Sciences), on n'est pas déçu.

Enfin le dernier article intéresse particulièrement les professeurs de physique. Il s'intitule « A l'école du ciel » (P 94) de Sophie Lherm ; il est sous titré : « Depuis trois ans, la cosmologie a fait son entrée au lycée. Elle permet aux enseignants de physique ou de philosophie de faire saisir à leurs élèves des notions fondamentales. Une expérience au bilan contrasté ».

La revue "**Pour la Science**" (Belin) a publié un dossier hors série (octobre/décembre 2004) intitulé "l'histoire de l'univers" et un numéro de la revue (n° 326 décembre 2004) consacré à Albert Einstein. Ces numéros sont excellents mais plutôt que de les décrire moi-même je vous transmets l'analyse faite par Nicole Née. "L'année 2005 sera celle de la physique. Que se doit-on de célébrer ? Le choix est vaste, tant la physique a connu des révolutions et des progrès spectaculaires au cours du siècle qui vient de s'écouler. Pourtant, le nom de Einstein s'impose presque inmanquablement. Il y a 100 ans, en 1905, un jeune homme prénommé Albert publiait coup sur coup trois articles marquants pour la postérité. L'un d'eux introduisait la théorie de la relativité, qui a bouleversé nos concepts d'espace et de temps. Un autre interprétait l'effet

photoélectrique (la production d'un courant électrique par une irradiation lumineuse) en termes de grains d'énergie que l'on nommera ensuite photons. Le troisième expliquait le mouvement brownien en termes de chocs moléculaires, ce qui servit, quelques années plus tard, à apporter la preuve irréfutable de l'existence des atomes. Comme le soulignent les articles de ce numéro spécial, les travaux d'Einstein, de 1905 jusqu'à sa mort en 1955, ont nourri ou annoncé une grande part de la physique d'aujourd'hui. De la théorie quantique à l'étude des particules élémentaires, de la physique du laser à la science du cosmos,

l'empreinte d'Einstein est omniprésente. L'emblématique savant, qui était aussi un citoyen engagé, a laissé ses traces dans nombre d'inventions qui animent notre quotidien : électricité d'origine nucléaire, lecteurs de CD ou de DVD, récepteurs GPS, etc. Et demain, peut-être, ses réflexions se matérialiseront par des lasers à atomes ou par des ordinateurs quantiques. Einstein, 50 ans après sa disparition, est toujours parmi nous." ■

DOCUMENTS ANCIENS

De Broglie et la nouvelle mécanique ondulatoire

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Pour continuer avec l'évocation des grandes démonstrations qui ont contribué à modifier la physique, nous reproduisons la démonstration originale de la relation qui établit l'équivalence entre une onde et une masse en mouvement.

Cette relation, découverte par Louis de Broglie, reçut une magnifique vérification expérimentale avec l'étude de la diffraction d'un faisceau d'électrons monocinétiques par un cristal de nickel, étude faite par MM. Davidson et Germer en 1927. Un faisceau d'électrons monocinétiques se comporte donc bien comme une onde !

La démonstration que nous reproduisons est tirée d'un mémoire publié en 1943 chez

Gauthier-Villars. Elle utilise justement la transformation de Lorentz dont nous parlions dans le CC109. Ce qui m'a frappé, c'est l'introduction d'idées neuves sans autre justification qu'une puissante intuition : "*...nous devons maintenant chercher à introduire un élément périodique ...sous la forme d'une onde stationnaire*". C'est aussi l'utilisation d'images très "einsteinienne" : "*... en imaginant une infinité de petites horloges disposées en tous les points du système propre du corpuscule*."

Ce mémoire présente, outre la démonstration reproduite, une remarquable présentation de la mécanique ondulatoire, preuve qu'il est parfois judicieux de lire directement les textes originaux.

PARTICULES A SPIN

CHAPITRE I.

IDÉES ET ÉQUATIONS GÉNÉRALES DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE.

1. Point de départ de la Mécanique ondulatoire. — L'idée qui a servi de point de départ à la Mécanique ondulatoire a été la suivante : puisque, pour la lumière, il existe un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire reliés entre eux par la relation : énergie = $h \times$ fréquence où figure la constante h des quanta de Planck, il est naturel de supposer que, pour la matière aussi, il existe un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire, ce dernier longtemps méconnu. Ces deux aspects doivent être reliés par des relations générales où figure la constante de Planck et doivent contenir comme cas particuliers les relations applicables à la lumière.

Pour développer cette idée, il faut chercher à associer un élément périodique au concept de corpuscule. Imaginons un corpuscule qui se meut d'un mouvement rectiligne et uniforme dans une certaine direction en l'absence de tout champ. Nous fixerons uniquement notre attention sur *l'état de mouvement* du corpuscule, abstraction faite de sa position dans l'espace. Ce mouvement s'effectue dans une certaine direction que nous prendrons comme axe des z et il est défini par les deux grandeurs « énergie » et « quantité de mouvement » dont les expressions relativistes en fonction de la masse propre m_0 du corpuscule et de sa vitesse $v = \beta c$ sont données par les formules (1)

$$(1) \quad W = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

(1) c désigne, suivant l'usage, la vitesse de la lumière dans le vide.

dont on tire la relation

$$(2) \quad \left| \vec{p} \right| = P = \frac{Wv}{c^2}.$$

L'état de mouvement se trouve ainsi défini pour un certain observateur A lié à un certain système de référence galiléen, observateur qui emploie un temps t et des coordonnées rectangulaires x, y, z .

Soit maintenant un autre observateur B qui possède par rapport à A la vitesse \vec{v} dans la direction Oz , autrement dit un observateur lié au corpuscule. Nous pouvons supposer que B a choisi un axe O_0z_0 qui glisse sur l'axe Oz et des axes O_0x_0 et O_0y_0 respectivement parallèles à Ox et Oy . Cela étant, les coordonnées $x_0y_0z_0t_0$ employées par B sont reliées aux coordonnées $xyz t$ de A par les formules bien connues de la transformation de Lorentz

$$(3) \quad x_0 = x, \quad y_0 = y, \quad z_0 = \frac{z - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad t_0 = \frac{t - \frac{\beta}{c} z}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Or, pour l'observateur B, la vitesse du corpuscule est nulle; il pose donc comme valeurs de l'énergie et de la quantité de mouvement

$$(4) \quad W_0 = m_0 c^2, \quad \vec{p}_0 = 0.$$

Suivant notre idée de base, nous devons maintenant chercher à introduire un élément périodique et nous tenterons de définir cet élément dans le système propre du corpuscule, c'est-à-dire dans le système de l'observateur B. Comme dans ce système tout est au repos, il est naturel d'y définir l'élément périodique souhaité sous la forme d'une onde stationnaire. Pour cela, nous définirons l'élément périodique par la grandeur supposée scalaire

$$(5) \quad \Psi_0 = A e^{2\pi i \nu_0 t_0}$$

qui a la forme de la représentation complexe d'une onde stationnaire. Ψ_0 oscille en fonction du temps propre avec une fréquence ν_0 caractéristique de la nature du corpuscule envisagé. Nous admettrons que A est une constante (en général complexe), de sorte que Ψ_0 ait la même valeur en tout point du système propre de l'observateur B à l'instant t_0 .

Nous pouvons nous représenter la répartition des valeurs de Ψ_0 en imaginant une infinité de petites horloges disposées en tous les points du système propre du corpuscule, synchronisées entre elles et possédant une période $T_0 = \frac{1}{\nu_0}$. Si l'aiguille de l'horloge a pour longueur A , Ψ_0 est

en somme l'affixe de l'extrémité de l'aiguille dans le plan du cadran, si l'on considère ce plan comme celui d'une variable complexe ayant son origine au centre du cadran.

Quelle valeur convient-il de donner à la fréquence propre ν_0 ? Nous devons évidemment chercher à la définir à partir d'une grandeur non nulle qui caractérise le corpuscule dans le système propre B et nous n'avons à notre disposition comme telle grandeur que l'énergie W_0 . Étant donné le rôle joué par la constante des quanta h dans toutes les théories quantiques, il est naturel de poser la relation

$$(6) \quad \nu_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{m_0 c^2}{h},$$

analogue à la relation d'Einstein pour les photons.

Comment va se manifester pour l'observateur A l'élément périodique que nous venons ainsi de définir entièrement pour l'observateur B? En supposant, ce qui est naturel ici, que l'élément Ψ est un invariant, il suffira pour obtenir son expression pour A de substituer dans son expression pour B la valeur de t_0 fournie par la 4^e équation (3) de Lorentz, ce qui donnera

$$(7) \quad \Psi(x, y, z, t) = A e^{2\pi i \nu \left(t - \frac{z}{V}\right)}$$

si l'on pose

$$(8) \quad \nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad V = \frac{c}{\beta} = \frac{c^2}{v}.$$

Ainsi, pour l'observateur A, les phases de l'élément périodique introduit sont réparties comme les phases d'une onde plane monochromatique dont la fréquence ν et la vitesse de propagation de la phase V ont les valeurs (8).

En comparant les formules (1), (4), (6) et (8), on trouve

$$(9) \quad W = h\nu,$$

et cette relation sera évidemment valable dans tous les systèmes galiléens puisque rien ne distingue l'observateur A d'un autre observateur galiléen. De plus, en définissant comme d'habitude la longueur d'onde de l'onde Ψ , on trouve pour cette longueur d'onde la valeur

$$(10) \quad \lambda = \frac{V}{\nu} = \frac{c^2}{v} \frac{h}{W} = \frac{h}{p},$$

formule fondamentale qui pour les faibles vitesses se réduit à

$$(11) \quad \lambda = \frac{h}{mv},$$

et qui a été vérifiée avec une grande précision par les expériences de diffraction des électrons par les cristaux.

Pour une particule de vitesse égale à c ou indiscernable de c , on a

$$(12) \quad v = V = c, \quad W = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}.$$

On retrouve bien ainsi les formules fondamentales de la théorie des quanta de lumière applicables aux photons.

Nous pouvons maintenant écrire la grandeur Ψ vue par l'observateur A sous la forme

$$(13) \quad \Psi = A e^{\frac{2\pi i}{h}(Wt - p_z z)},$$

ou, plus généralement, si l'on n'a pas pris la direction de propagation comme axe des z :

$$(14) \quad \Psi(x, y, z; t) = A e^{\frac{2\pi i}{h}(Wt - p_x x - p_y y - p_z z)} = A e^{\frac{2\pi i}{h}(Wt - \vec{p} \cdot \vec{r})}.$$

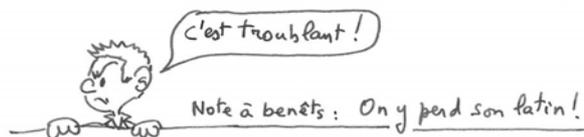
Cette formule nous montre que la *phase* de l'onde Ψ coïncide, au facteur $\frac{2\pi}{h}$ près, avec l'Action hamiltonienne du corpuscule. En constatant cette proportionnalité entre l'action du corpuscule et la phase de l'onde Ψ qui lui est associée, on aperçoit que le principe d'action stationnaire valable pour la Dynamique du corpuscule doit n'être qu'une traduction du principe de Fermat valable pour l'onde associée. Mais la théorie ondulatoire nous apprend que le principe de Fermat est valable seulement dans le domaine où l'Optique géométrique est utilisable et perd sa valeur dans le domaine de l'Optique physique proprement ondulatoire. On parvient ainsi à l'idée fondamentale que l'ancienne Mécanique (aussi bien sous sa forme relativiste que sous sa forme newtonienne classique) n'est qu'une approximation ayant le même caractère de validité que l'optique géométrique. Dès lors, on est amené à concevoir la nécessité de construire une nouvelle Mécanique, une Mécanique ondulatoire, qui serait à la Mécanique ancienne ce qu'est l'Optique ondulatoire à l'Optique géométrique. C'est cette idée dont nous allons voir le développement.

REMUE-MENINGES

Le mélange des couleurs

Vous êtes-vous demandé pourquoi un mélange par exemple de poudres jaune et bleu nous apparaissait vert ? A chaque couleur correspond une longueur d'onde. Il semble donc qu'en mélangeant deux longueurs d'onde on puisse en générer une troisième. C'est un peu comme si en musique, en jouant un do et un mi, on entendait un ré.

Evidemment ceci est faux. Sauriez-vous expliquer pourquoi ?



Au fil des perles des enseignants et des astronomes

Les unités physiques fondamentales ont très souvent été choisies en rapport avec notre propre échelle. Le mètre est, en ordre de grandeur, de la taille d'un homme, sans parler des unités plus anciennes le "pouce" ou le "pied". On retrouve ce sens profond dans une réflexion d'un élève qui voulant justifier sa confusion entre les litres et les mètres avait déclaré à son professeur de mathématique : "Un litre [d'eau] vaut un mètre, car c'est la longueur sur laquelle s'étire l'eau quand on la verse sur le sol."

Mais, quand les astronomes expriment les distances en kilomètre par seconde, en utilisant implicitement la loi de Hubble qui relie la vitesse cosmologique à la distance, ils pourraient aussi surprendre nombre de personnes.

LECTURE POUR LA MARQUISE

Jean-Noël Terry

Mars comme si vous y étiez

Guillaume Cannat et Didier Jamet, éd. Eyrolles, ISBN 2-212-11537-7.

Pour ce livre nous changeons de format et nous serons sollicités par les images.

Dès l'introduction nous réalisons le chemin parcouru par la technique : sur une page figurent un dessin de Mars par Eugène Antoniadi en 1926, une image prise par le télescope Hubble en 2003 et un panorama martien par Spirit en 2004.

Il faut rêver devant ces photos grand format d'excellente définition, s'imaginer circulant dans ces paysages extraordinaires. Philosopher, si vous le voulez, devant les traces de roues hésitantes, laissées par Opportunity cherchant à grimper la côte de son cratère.

C'est une excellente idée que d'avoir regroupé par thèmes (En orbite, Volcans, Fleuves, Canyons, etc...) des images des différentes missions, en le situant sur un globe, et en joignant un commentaire clair et précis. Donc à savourer de différentes façons !

Le Titan Moderne

Albert Badoureau, éd. Actes Sud/Ville de Nantes, ISBN 2-7427-5243-9

2005 est l'année de la physique ? d'Einstein ? certes ! Mais c'est aussi celle de Jules Verne. Ne boudons pas notre plaisir pour un auteur qui en a fait rêver plus d'un.

Colette Le Lay et Olivier Sauzereau nous proposent les notes et observations remises à Jules Verne par Albert Badoureau, polytechnicien et ingénieur des Mines. Ces notes concernent trois romans : « Sans dessus dessous », « De la Terre à la Lune » et « Autour de la Lune ».

Cet inédit présente, face-à-face, le manuscrit et sa présentation imprimée. Rappelons que dans le premier titre, il ne s'agit de rien moins que de faire basculer l'axe de la Terre !

Nous découvrons donc très concrètement la méthode de travail de Jules Verne : une grande imagination créatrice qui s'appuie, autant que

possible, sur des bases solides, celles des connaissances de son époque.

On ne s'étonnera plus que l'auteur fasse partir ses héros pour la Lune depuis la Floride, après les calculs d'Henri Garcet, cousin de Jules Verne et mathématicien ; ou de voir voler un hélicoptère de 30 mètres de long, après le brevet déposé par Alphonse Penaud en 1871.

Pour les titres qui nous intéressent, Albert Badoureau ne laisse rien passer au rêveur : « Comment M.Jules Verne définit-il à la surface de la Lune les quatre points cardinaux ? ».

Découvrir cette collaboration justifie à elle seule la lecture de ce livre. On peut aussi envisager d'aller plus loin : reprendre les calculs (on appréciera d'utiliser l'écriture scientifique des nombres !) ; on peut aussi élargir le sujet en confrontant les écrits de Jules Verne, les remarques de son « conseiller scientifique » et les connaissances de l'époque.

Terminons par un peu d'humour avec une autre note d'Albert Badoureau : « Dire que le zéro du thermomètre émerge du bain de mercure me paraît une façon ampoulée de dire qu'il gèle ».

Dur retour à la réalité des choses...

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 ! A ce titre, seule l'influence de la Lune répondrait à la définition.

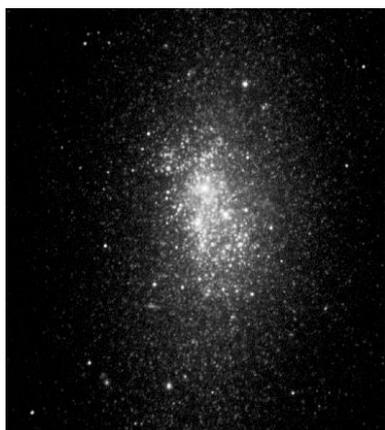
Mais s'il faut conseiller la lecture de ce livre, c'est par le point concis, mais précis, et documenté sur le plan historique, qui est fait pour chaque thème abordé.

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

LES POTINS DE LA VOIE LACTEE

Une galaxie primordiale

Des astronomes de l'ESO viennent de capturer des images très détaillées d'une galaxie proche afin d'étudier la formation des étoiles dans un environnement "quasi primordial" NGC5253.



*Photo European Southern Observatory
NGC5253 vue en Infrarouge (K)*

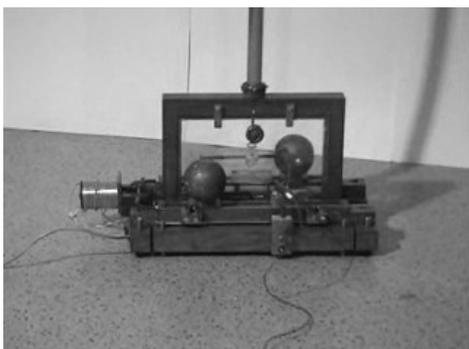
Cette galaxie très proche de nous, contient 115 amas d'étoiles en formation. Certains amas ont un âge qui ne dépasse pas les 20 millions d'années. Cette galaxie qui est 100 fois plus petite que notre Voie Lactée est sans doute une de ces briques élémentaires qui furent si nombreuses lorsque l'Univers était beaucoup plus jeune. Ce sont de telles "briques" qui en s'agglomérant au cours du temps, ont donné naissance aux galaxies d'aujourd'hui. Pour avoir accès aux images et en savoir plus sur ce programme de recherche : <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2004/phot-31-04.html>

Daniel Kunth,
Correspondant français
de l'ESO auprès des medias

LA VIE ASSOCIATIVE

Mosaïque de la Physique

L'exposition itinérante, *Mosaïque de la Physique*, a été conçue pour célébrer l'Année Mondiale de la Physique. Le CLEA participe à cette opération avec la balance de Cavendish que nous présentons dans les Cahiers Clairaut 104 et 105. Une nouvelle balance automatique a été réalisée pour cette exposition.



La nouvelle balance de Cavendish, entièrement automatisée.

D'autres expériences très spectaculaires sont montrées : l'effet Branly, les solitons, les pendules chaotiques, les cellules de Bénard semblables à celles qui expliquent la granularité de la surface solaire. Une exposition passionnante !

Le CLEA pourrait envisager de mettre l'expérience de Cavendish à la disposition des

établissements scolaires intéressés, à partir de 2006. Une idée à creuser et peut-être ... attractive. **G.P.**

Manifestations astronomiques.

Mentionnons la manifestation organisée en mai dernier par la **Société Astronomique de Bourgogne (SAB)**, que notre ami, P. Causeret anima jusqu'à cette année. Cette sympathique association organise : des cours, des ateliers, des travaux pratiques et des "cafés astro", tout à fait dans l'esprit du CLEA. La journée organisée le 4 mai 2005 visait à faire connaître à un large public les différentes ressources de la région de Bourgogne : le CRDP, la SAB, le planétarium itinérant et bientôt un nouveau planétarium au muséum de Dijon.

Site : <http://www.astrosurf.com/sab>

"**Deux mois de l'astronomie**" seront organisés du 3 juin au 31 juillet 2005 au Cagnet des Maures par Daniel Joubin avec son Association d'Astronomie Amateur le Cagnetoscope des Maures. Nous souhaitons un vif succès à cette manifestation à laquelle le CLEA s'associera.

Contact : AAACDM,
990 chemin de Chante-coucou
83340 Le Cagnet des Maures.

G.P.

Liste de diffusion

Les adhérents qui souhaitent être inscrits peuvent envoyer un message à : jripert@ac-toulouse.fr. Ils recevront en retour un fichier d'aide pour ouvrir un compte. N'hésitez pas, j'attends vos messages.

Jean Ripert, secrétaire du CLEA

Solution du remue-méninges :

Notre œil est sensible, par ses capteurs, à trois couleurs fondamentales. Cela signifie que chaque couleur se décompose en intensités différentes sur les trois capteurs. Mais, il n'y a pas unicité de la solution. Je peux créer la même excitation sur chacun des capteurs en envoyant un mélange de couleurs. Pour le son c'est très différent, notre oreille possède une cavité conique enroulée, le limaçon, où toutes les longueurs sonores peuvent être captées. **G.P.**

Articles à venir

Cours élémentaire VII ; Pendule de Foucault en carton ; La distance de la galaxie M31 ; Les étoiles variables ; Mesure absolue de l'attraction terrestre par interférométrie atomique. Les gravitations imaginaires. La température des étoiles. Les ondes gravitationnelles.

Remerciements: Nous remercions Michel Bobin et Christian Larcher pour la relecture de ce Cahier ainsi que Chantal Petit pour son assistance.

Les fiches pédagogiques du CLEA

HS1 L'astronomie à l'école élémentaire	10 €
HS2 La Lune, niveau "collège"	10 €
HS3 Le temps, les constellations, niveau "lycée"	10 €
HS4 Astronomie en quatrième	10 €
HS5 Gravitation et lumière, niveau "terminale"	12 €
HS6 L'âge de la Nébuleuse du Crabe, niveau "lycée"	
4 diapositives et 12 jeux de 2 photographies	16 €
HS7 Etude du spectre du Soleil	8 €
HS8 Etoiles variables	12 €
HS9 Mathématiques et Astronomie	12 €

Numéros hors série des Cahiers Clairaut réalisés par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA.

Documents édités par le CLEA

Transparents animés pour rétroprojecteurs	8 €
T1 le Transsolute (phases de la Lune et éclipses)	
T2 Les fuseaux horaires	
Filtres colorés	11 €
Six feuilles de filtres colorés et une feuille de réseaux	
CD ROM CLEA	8 €
Astronomie et Astrophysique Programme de seconde, collège, TPE	
CD ROM Collection des Cahiers Clairaut	30 €
du numéro 1 au numéro 108 avec index de recherche	
Documents photographiques CLEA-Belin	5 €
20 exemplaires des 8 documents (phases de la Lune spectres de Rigel, Saturne, Arcturus, 69 Pisces, etc)	

Publications du CLEA

Les publications ne peuvent être vendues qu'aux adhérents du CLEA (loi de 1901). Prix franco de port.
Toute commande de documents est à envoyer à :

CLEA - Laboratoire d'Astronomie, Bât. 470 – Université Paris Sud – 91405 Orsay cedex

En joignant un chèque à l'ordre du CLEA.

Fascicules pour la formation des maîtres en astronomie

F1 L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps	7 €
F2 Le mouvement des astres	8 €
F3 La lumière messagère des astres	9 €
F4 Naissance, vie et mort des étoiles	10 €
F6 Univers extragalactique et cosmologie	9 €
F7 Une étape de la physique, la relativité restreinte	16 €
F8 Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie	10 €
F9 Le système solaire	14 €
F10 La Lune	10 €
F11 La Terre et le Soleil	12 €
F12 Simulation et astronomie sur ordinateur	8 €

Cours photocopiés d'astrophysique

Maîtrise de l'université Paris XI Orsay

P1 Astrophysique générale	10 €
P2 Processus de rayonnement	5 €
P3 Structure interne et évolution des étoiles	5 €
P4 Astrophysique solaire	5 €

Diapositives

Chaque série de 20 vues avec son livret de commentaires 10 €

D1 Les phénomènes lumineux	
D2 Les phases de la Lune	
D3 Les astres se lèvent aussi	
D4 Initiation aux constellations	
D5 Rétrogradation de Mars	
D6 Une expérience pour illustrer les saisons (série de 8 vues)	5 €
D7 Taches solaires et rotation du Soleil	
D8 Comètes	

CONDITIONS D'ADHESION ET D'ABONNEMENT POUR 2004

Adhésion au CLEA pour 2005	5 €
Abonnement aux CAHIERS CLAIRAUT n° 109 à 112	25 €
<i>L'adhésion est indispensable pour tout achat de documents y compris l'abonnement aux Cahiers Clairaut</i>	
Le numéro des Cahiers Clairaut	7 €
COLLECTIONS DES CAHIERS CLAIRAUT des années antérieures :	
. du début (1978) à 1997	14 €/an
. à partir de 1998	17 €/an
COLLECTION COMPLETE DES CAHIERS CLAIRAUT SUR CD-ROM du n° 1 au n° 108	30 €

Pour adhérer au CLEA et s'abonner aux Cahiers Clairaut, s'adresser à :
Béatrice Sandré, trésorière du CLEA,
11, rue Couperin – 91440 BURES SUR YVETTE. Chèque à l'ordre du CLEA.

CLEA

Laboratoire d'astronomie, bât. 470

Université de Paris Sud, 91405 ORSAY cedex

Tél./fax : 01 69 15 63 80

Adresse électronique : clea.astro@astro.u-psud.fr

Adresse du site du CLEA : www.ac-nice.fr/clea

Trois livrets (40 pages en quadrichromie), 1CD et 1 DVD en exclusivité pour le **CLEA** :

- Livrets "Terre, Planète à Protéger" (par J. diMeglio, géophysicienne) et "L'univers astronomique" (par A. Acker et J.C. Pecker, astrophysiciens) – Format A5 – Prix unitaire = 1,2 € HT
 - Livret "La Terre et son Univers en 7 animations" (par M. Dumas) – A4 – Prix unit = 2,5 € HT
- **Offre spéciale = 36 € pour 10 de chacun des livrets (30 en tout) soit 1,2 € HT par livret**
- CD "Terre, planète à protéger" (avec animation sonores, vidéos et images) pour 8 € HT
 - DVD "40 ans de l'ESO" (d'après un film de 52 minutes) pour le prix exceptionnel de 4 € HT

(+ TVA = 5,5 %). Merci de vous adresser à Laurence DEMOND, APLF – Observatoire de Strasbourg
11, rue de l'université – 67000 Strasbourg (Fax 03 90 24 24 17) e-mail : aplf@astro.u-strasbg.fr

Directeur de la Publication : Georges Paturel
Imprimerie Haugel, 92240 Malakoff

dépôt légal : 1er trimestre 1979
numéro d'inscription CCPPAP : 61660
prix au numéro : 7 €