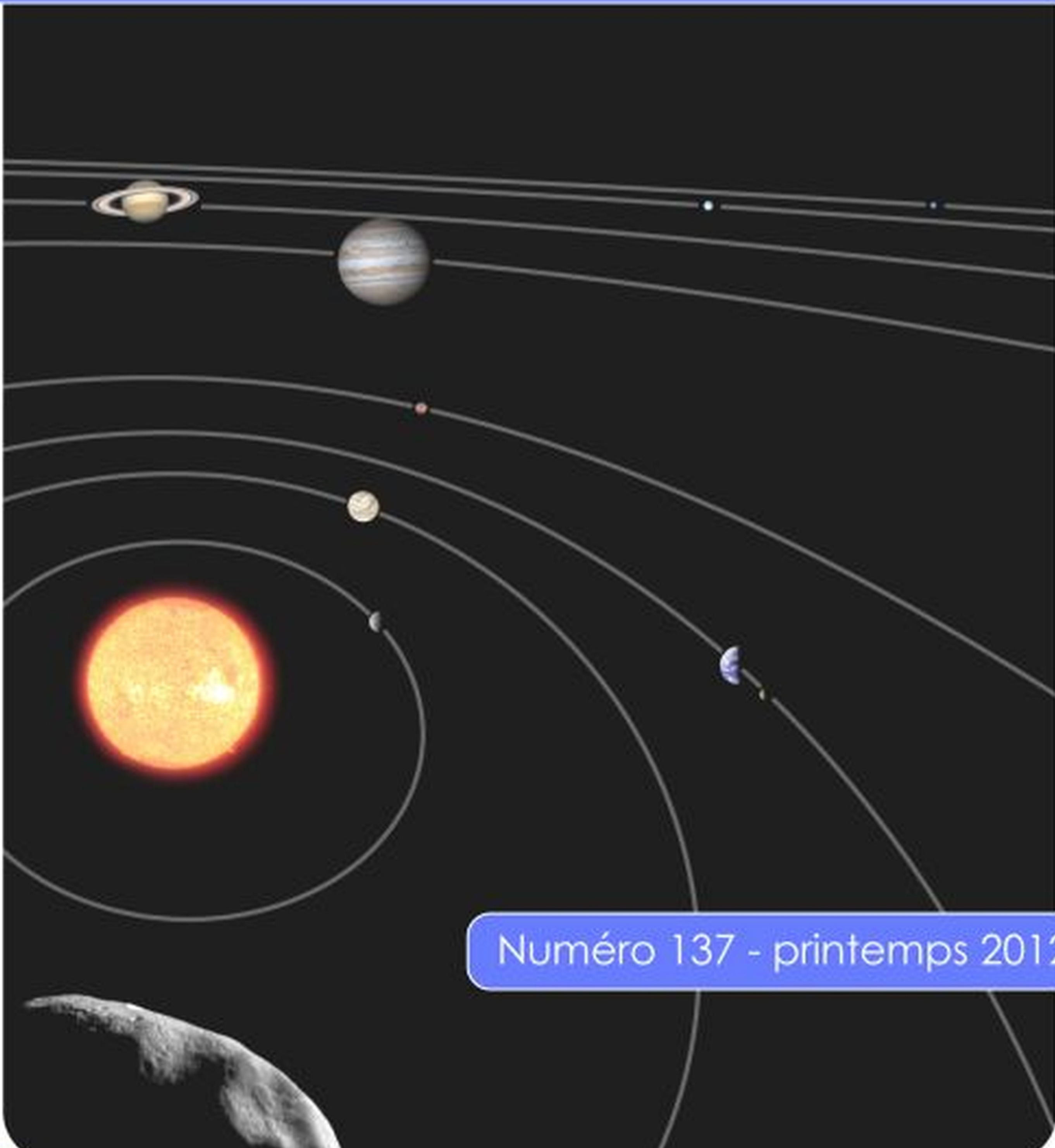
LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 137 - Mars 2012 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 137 - printemps 2012

ISSN 0758-234X

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2012 n° 137

Éditorial

Connaissez-vous la signification des mots Killa, Uma, Qhapac, Pacha ?
Savez-vous ce qu'est un quipu ? Si ce n'est pas le cas, nous vous conseillons de lire l'article sur les calendriers des Incas et d'enrichir votre vocabulaire à l'aide du lexique qui s'y trouve.
Le 6 juin 2012 Venus va passer devant le Soleil pour la seconde fois au XXIe siècle. Le passage suivant aura lieu en… 2117. Ce passage de nos jours est devenu un peu anecdotique mais son importance historique était telle qu'en 1769 il donna lieu à de nombreuses expéditions, au total 151 observations sur 77 sites différents. L'objectif poursuivi était toujours le même : effectuer des mesures précises afin de déterminer la valeur de l'Unité Astronomique (UA) c'est-à-dire la distance entre la Terre et le Soleil. La méthode utilisée se trouve décrite dans l'article intitulé *"Comment mesurer l'Univers ?"* Au passage vous noterez qu'à partir d'une même observation on aboutit à des résultats complètements différents selon le modèle d'univers utilisé.
Vous découvrirez comment Cassini et Richer parvinrent à mesurer la parallaxe de Mars et en quoi cette mesure était importante pour déterminer la valeur de l'UA. La partie historique relate les efforts entrepris par les scientifiques pour préparer au mieux cet événement. Le CLEA vous propose de refaire avec vos élèves cette mesure en collaboration avec des lycées français à l'étranger particulièrement bien placés (Hawaï, Australie, Pacifique, Asie orientale)
Avec vos élèves à l'école primaire, vous pourrez réaliser une expérience toute simple visant à construire un système solaire à l'échelle sans aucun calcul.
Avec des élèves de lycée, vous retrouverez la distance Terre-Lune à quelques centimètres près à l'aide des mesures de télémétrie laser effectuées à l'Observatoire de la Côte d'Azur sur le plateau de Calern.
Enfin, pour préparer l'introduction de la relativité restreinte dans les prochains programmes de physiques, nous vous proposons un article d'Étienne Klein expliquant pourquoi, en relativité, tout n'est pas relatif.
Christian Larcher, pour l'équipe.

Pour ceux qui ne l'ont pas fait, il est urgent de vous réabonner.

Voir page 40

HISTOIRE

Les calendriers des Incas

Alain Brémond, Société Astronomique de Lyon, Observatoire, St-Genis-Laval

Ce calendrier des Incas pose des problèmes à notre esprit "cartésien" pour deux raisons: il n'était pas terminé et l'absence d'écriture et les destructions systématiques opérées par les Espagnols rendent difficile sa reconstruction.
C'est différent pour les Mayas: ils avaient une écriture, entièrement déchiffrée aujourd'hui, leur civilisation était aboutie et avait disparu au moment de l'arrivée des Espagnols. Leurs calendriers étaient inscrits sur des stèles en pierre protégées par la végétation au moment de l'arrivée des Espagnols : elles n'ont été redécouvertes que tardivement. Par ailleurs, bien que les codex mayas aient été détruits, il reste trois documents écrits dont un sur les calendriers mayas.

Après la conquête de l'empire inca par Francisco Pizzaro (1516-1544) et la mort du dernier empereur Manco Capac II en 1545, la destruction des documents et même de certains monuments fut systématique. Ce qui nous reste de la culture inca provient soit de fouilles archéologiques soit de reconstitutions par des descendants cultivés comme Garcilaso de la Vega (1539-1616) et Felipe Guaman Poma de Ayala (1536-1616) ou par quelques lettrés espagnols défenseurs de cette culture, tel Blas Valera (1545-1597), Martin de Muria (1525-1618) et Bernabé Cobo (1582-1687). Parmi les travaux récents, il faut citer ceux de Anthony Aveni, Laura Laurencich-Minelli, Giulio Magli ou de R. Tom Zuidema.
Les Incas apparaissent sur la scène historique au XIII^{e} siècle. Ils s'imposent aux peuples déjà installés tout en adoptant un certain nombre d'éléments de leur culture. Il faut citer en particulier les cultures Chancay, Chimú, Ica et Huari pour les plus récentes.

Pour comprendre les différents calendriers des Incas, il faut rappeler quelques notions astronomiques simples :
- Le mois synodique (retour de la nouvelle Lune ou lunaison) est approximativement de 29,5 jours. Ce qui implique que deux mois synodiques font 59 jours et que 12 lunaisons comprennent 354 jours. Le mois sidéral, calculé à partir du retour d'une même position de la Lune par rapport aux étoiles est de 27,3 jours. Il y a un peu plus de 13 mois lunaires sidéraux dans une année solaire de 365 jours.
- L'année tropique est de 365,25 jours et l'année "usuelle" est de 365 jours. Il manque donc onze jours pour adapter une année lunaire synodique à l'année solaire. Il faut aussi la corriger tous les quatre ans en rajoutant un jour. Les Incas essayèrent différentes solutions pour résoudre ces difficultés.

Les quipus

Parmi la documentation sur les calendriers, les quipus occupent une place particulière (6)[1]. Le mot de *quipu* est la traduction du mot *quechua*[2] signifiant "nœud". Ils sont en effet formés de cordelettes attachées à une corde maîtresse et souvent regroupées en séries d'un nombre variable. Les cordelettes sont nouées pour former une suite de nœuds de formes et de nombre variables (figure 1). Le code est constitué de plusieurs couleurs différentes qui teintent les cordelettes et y déterminent des zones différentes et des nœuds échelonnés sur les cordelettes. Des cordelettes secondaires pouvaient être attachées sur la cordelette principale (figure 1) et porter soit des nœuds soit des indications sous forme de dessins.

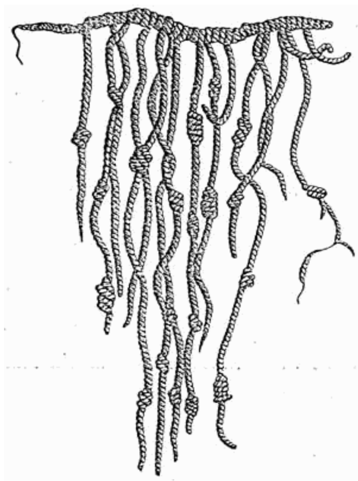


***Fig.1.** Un quipu type.*

[1] Les numéros entre parenthèses renvoient à la bibliographie à la fin de l'article.
[2] Les mots en italique sont expliqués dans le lexique.

Quelques-uns des 600 quipus conservés semblent correspondre à des calendriers (3). L'un d'eux compte 730 cordelettes rassemblées en 24 groupes de 30 petites cordes. Il pourrait s'agir d'un calendrier courant sur deux années de 365 jours avec 12 mois de trente jours. Trois quipu-calendriers ont été particulièrement étudiés. Le *Ica quipu* date de la période pré-Inca. Celui des *Chachapuyas* est plus tardif, élaboré au début de la période coloniale ; il a subi l'influence espagnole et tente de rapprocher les connaissances anciennes avec le calendrier catholique. Pour cette raison, nous ne développerons pas ce calendrier. Un autre calendrier date de la civilisation *Huari*, pré-inca (de 700 à 1200 environ). Il n'a pas encore été étudié en détail. Les historiens ont bien montré que la culture inca a hérité des cultures pré-incas et que cela s'applique aussi à l'élaboration des calendriers.

Le calendrier quipu de la culture Ica (9)

Il comporte une série de six cordelettes portant respectivement 60, 54, 60, 61, 60 et 70 nœuds soit au total 365 nœuds. Les cinq premiers totalisent 295 jours soit dix mois synodiques. Ils correspondent en moyenne à des mois doubles de 59 jours lunaires où les jours surnuméraires, respectivement de 1, 1, 2, 1 soit 5, sont rattrapés par le mois de 54 jours. Par contre rien ne permet d'expliquer l'utilisation du mois de 70 jours pour compenser à la fois la différence avec 12 mois lunaires soit 354 jours et le reste pour atteindre 365 jours. Ce nombre de 70 pourrait se décomposer en 59 jours (soit deux mois lunaires) et 11 jours pour rattraper l'année solaire.

Le pachaquipu de Blas Valera (5,8).

Il s'agit d'un dessin sur deux pages représentant un *quipu* qui date du début des années 1600. Il a été bien étudié par plusieurs archéologues dont Laura Laurencich-Minecelli, Giulio Magli et R. Tom Zuidema.

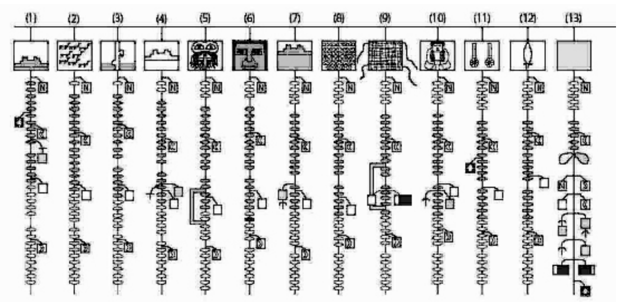


Fig.2. *Représentation schématique du pachaquipu (dessiné par Blas Valera, crédit Laurencich-Minelli).*

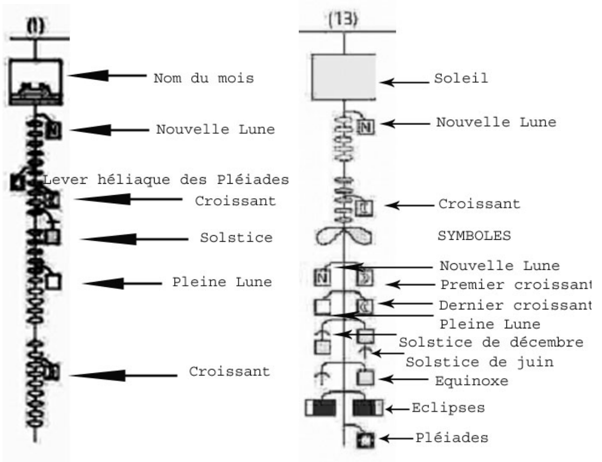


Fig.3. *À gauche le premier mois. Deux couleurs séparent le mois en deux parties de 15 jours et les trois semaines de 10, 10 et 9 jours. À droite, la partie haute représente le treizième mois et la partie inférieure est un dictionnaire des symboles employés.*

Ce quipu comporte treize cordelettes. Les douze premières sont surmontées de cartouches qui représentent les mois. Le premier mois comprend trois groupes respectivement de dix, dix et neuf nœuds séparés par un espace (figure 3a). Un dixième nœud (le dixième jour de la semaine de dix jours) est reporté sur la cordelette suivante. Les deux mois suivants sont identiques mais le quatrième et le cinquième portent deux nœuds additionnels en haut de la cordelette. Ainsi chaque mois comporte vingt-neuf jours ou trente jours et des semaines de dix jours. Des couleurs différentes (rouge et jaunes) permettent de diviser le mois lunaire en deux périodes de quinze jours. Au total il y a 365 jours. Les douze premiers mois comptent 355 jours soit la durée de douze périodes synodiques de la Lune. Les dix jours supplémentaires ne suffisent pas, dans ce *quipu*, à faire correspondre exactement le calendrier lunaire avec la durée de l'année solaire de 365,25 jours. La treizième corde compte cinq nœuds jaunes pour faire douze mois synodiques de 29,53 jours et cinq nœuds rouges pour atteindre la durée de l'année solaire.

L'étude des symboles permet de remarquer que chaque mois commence à la Nouvelle Lune. Le solstice de juin apparaît entre le huitième et le neuvième jour du mois 1, celui de décembre entre les jours 14 et 15 du mois 7. Les équinoxes sont présents les mois 4 et 10. On note une éclipse de Lune entre les jours 15 et 16 du mois 9. Quant au symbole des Pléiades, ils sont présents au mois 1 et au mois 11. Les autres symboles marquent les phases de la Lune.

Un certain nombre de repères permettent de dater ce calendrier. Un nœud noir (figure 2, mois 6) correspond à la bataille de Cajamarca qui s'est déroulée le 16 novembre 1532. Avec ce repère, le début du calendrier correspond donc au 3 juin 1532 et se termine le 2 juin 1533. Cette chronologie est confirmée par les observations des solstices et des équinoxes. Aucun symbole d'éclipse de Soleil n'est retrouvé sur le *quipu*. On a pu vérifier qu'il n'y en avait effectivement pas eu dans cette période. Par contre une éclipse de Lune est notée, correspondant au neuvième mois : il y en a bien eu une ce jour là le matin. Les marques en forme de "[" aux mois 5 et 9, encadrent les moments des passages du Soleil au zénith dans la région de Cuzco[3].

Les écrits des lettrés proches ou parents des Incas.

Inca Garcilosa de la Vega (4) est le fils d'un espanol contemporain de Pizzaro et d'une princesse inca Chimpu Occlo, descendante de l'Inca Huallpa Tupac. Il avait appris la langue *quechua* et la lecture des *quipus*. Dans deux chapitres, il nous livre ce qu'il sait des calendriers incas.

Des observatoires étaient construits dans leur capitale Cuzco pour observer les événements remarquables touchant le Soleil. Des colonnes de pierre, sortes de portes, repéraient les lever et coucher du Soleil aux solstices et aux équinoxes tandis que des colonnes formant des gnomons permettaient de repérer le midi solaire et le passage, deux fois l'an, du Soleil au zénith. D'autres systèmes existaient aussi dans d'autres villes, notamment au Machu Pichu.

Voici ce que décrit Garcilaso : "L*es prêtres, quand ils prévoyaient que le jour de l'équinoxe approchait, notaient avec soin la longueur de l'ombre qu'elles faisaient [les colonnes]. Les colonnes étaient au centre d'un très grand cercle, partagé par une grande ligne qui allait d'orient en occident qu'ils avaient tracé grâce à leur longue expérience. Par l'ombre que la colonne faisait sur la ligne, ils voyaient que l'équinoxe approchait et quand l'ombre parcourait la ligne d'un bout à l'autre : c'était l'équinoxe*[4]".

Les solstices étaient matérialisés par des tours. Ces tours se confondaient avec celles qui matérialisaient les *ceques*[5]. Tous ces édifices ont été détruits en 1563 par les Espagnols comme impies.

Les mois commençaient à la Nouvelle Lune et d'ailleurs le mot *mois* était le même que celui de la Lune : *quilla*. Il n'y avait pas de nom pour les jours. La division de l'année semble avoir été double : lunaire en raison de sa simplicité d'observation, mais adaptée au cycle solaire pour les besoins des prêtres et de l'Inca et pour que la correspondance du calendrier avec les saisons persiste d'une année sur l'autre. C'est d'ailleurs l'état centralisé qui fixait les dates des semailles, basées sur le calendrier solaire.

Garcilosa réfute l'idée d'un ajustement des deux cycles lunaire et solaire sous forme d'un calendrier luni-solaire mais précise que les deux calendriers n'étaient que superposés, comme le montre d'ailleurs le *pacha quipu*.

Le système des Ceques.

Les *ceques* représentent un système de repères de direction partant de la ville de Cuzco. Ils sont matérialisés dans le paysage par des constructions diverses correspondant à des zones considérées comme sacrées : les *huacas* (6). On distingue 41 *ceques* et 42 directions (une est prolongée dans la direction opposée (en pointillés sur la figure 4).

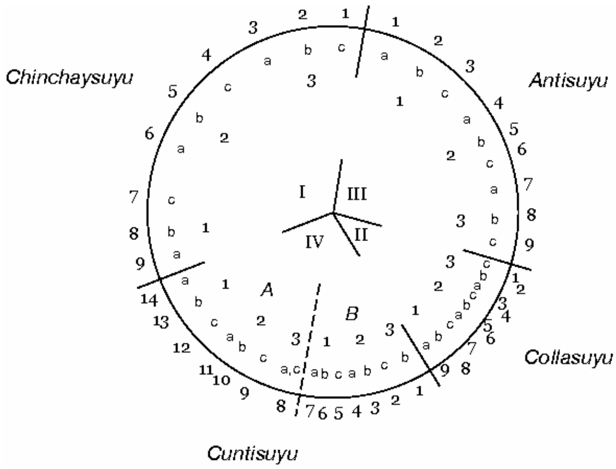


***Fig.4**. Division des ceques (le terme de suyu caractérise des divisions territoriales de la région de Cuzco, au nombre de quatre). La direction du Nord correspond au chiffre 1 (crédit Zuidema).*

Deux de ces *ceques* correspondent aux directions des solstices et deux autres aux passages du Soleil au zénith. Les *ceques* ne correspondraient pas à une division du cercle en degrés mais à une division de l'année en périodes inégales (figure 5).

3 Cuzco est à 13,5° de latitude sud. Comme depuis tout lieu situé entre les tropiques, on voit le Soleil passer deux fois par an au zénith (à la verticale) à midi.

4 Le jour de l'équinoxe, le Soleil est dans le plan de l'équateur et l'ombre d'un point au cours de la journée suit une ligne droite orientée est ouest (alors que c'est une courbe les autres jours, un arc d'hyperbole).

5 Voir plus loin l'explication de ces ceques et leur rôle calendaire.

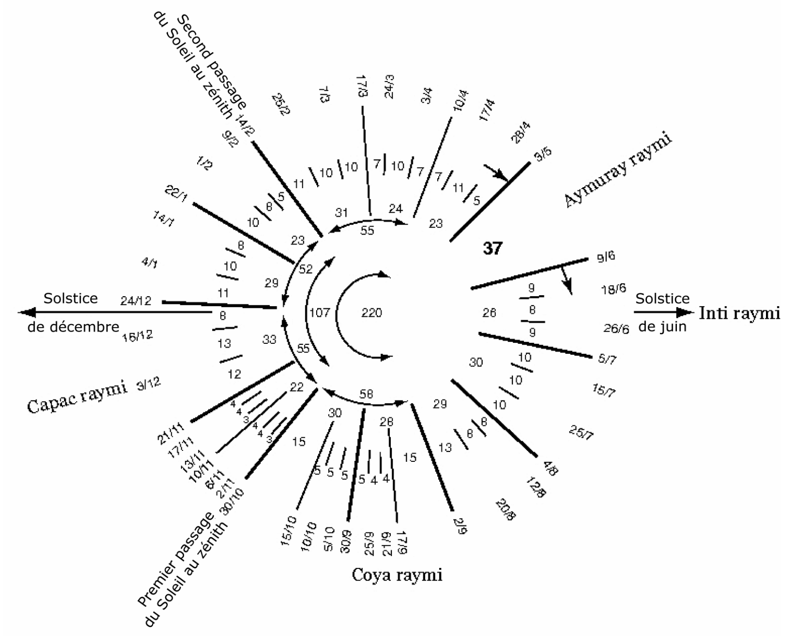


***Fig.5**. Les ceques comme calendrier d'après Zuidema (8).*
Certains mois importants sont indiqués : Coya rayni, Capac rayni, Aymura rayni et Inti rayni (voir plus loin). Les dates des solstices et des passages du Soleil au zénith sont indiqués (crédit Zuidema).

À partir de textes d'érudits espagnols et en se basant sur plusieurs divisions territoriales au Pérou et en Bolivie, Zuidema attribue à cette sorte de cartographie très sophistiquée des Incas une valeur de calendrier. Il serait basé sur la révolution sidérale de la Lune de 27,3 jours et sur les événements solaires remarquables que sont les solstices et les équinoxes ainsi que les passages au zénith du Soleil.
La subdivision territoriale, calquée sur la division en *suyus,* correspond à une division du temps en mois et en saisons de durées inégales. Son adéquation avec les fêtes religieuses, les services dus à l'Inca et au protocole de la cour montrent, s'il en était besoin, l'utilisation de la maîtrise du temps dans le gouvernement des peuples.

Au total, deux calendriers

En effet les Incas possédaient deux calendriers. L'un solaire de 365 jours et l'autre lunaire de 354 jours. Ceux-ci étaient attribués au dieu solaire *Viracocha*. L'Inca Pachacuti qui régna de 1438 à 1471, soit une soixantaine d'années avant l'arrivée des Espagnols, l'aurait modifié et certains pensent que ces calendriers n'étaient pas totalement fixés lors de l'arrivée des Espagnols au Pérou.

Le calendrier solaire.

Comportant douze mois de trente jours, et cinq jours de fêtes. Il manquait un quart de jour chaque année. Les Incas recalaient leur calendrier au moment du solstice d'été (en décembre dans leur hémisphère).
Pour cela ils disposaient de systèmes gnomoniques pour repérer solstices et équinoxes. Ce calendrier solaire était utilisé pour garder un temps asservi aux saisons d'une année sur l'autre et pour définir les fêtes religieuses liées au dieu Soleil.

Le calendrier lunaire

Les mois de vingt-neuf et de trente jours étaient divisés en trois périodes de dix jours. Tous les trois ans, l'année comptait treize lunes. Un cycle lunaire complet comptait ainsi 37 lunes. Vingt de ces cycles formaient une période de soixante années elle-même divisée en quatre parties de quinze ans. Il était utilisé pour rythmer la vie des cités, définir le moment des activités agricoles et les fêtes civiles et religieuses. Sur ce calendrier lunaire "naturel", les savants incas reportaient les dates des fêtes civiles et religieuses.
Plusieurs types de calendriers lunaires ont été décrits. Celui du *pachaquipu* comportait douze mois lunaires soit 354 jours mais un autre calendrier purement lunaire, avec des mois sidéraux, commençait au lever héliaque des Pléiades, soit le huit septembre. Il se terminait à la première Pleine Lune suivant le solstice d'hiver (en juin). Comme il manquait trente-sept jours et quart par rapport à l'année solaire, les Incas introduisaient des jours intercalaires. Ces jours représentaient des jours d'inactivité relative aux travaux agricoles.

Les douze mois lunaires selon Guaman Poma [2]
L'auteur commence ainsi sa description: "*Chapitre premier des années, mois des Incas. Mois et années et dimanches que comptaient les Incas dans ce règne, que les philosophes et astrologues anciens comptaient la semaine de dix jours et le mois de trente jours*".
A priori, rien n'indique qu'ils avaient séparé le jour et la nuit en périodes. Ils repéraient le lever et le coucher du Soleil ainsi que son passage au méridien et cela suffisait pour leurs activités (1, 11).
La suite des jours était marquée par les phases de la Lune. Il dit aussi qu'il existait des calendriers sous forme de quipus : "*Les dits douze mois formaient une année et pour définir cet ordre ils faisaient des quipus de tout ce qui s'était passé dans ce royaume pendant cette année"*. Ainsi, le quipu aurait été, selon lui, plus une chronique qu'un calendrier. Dans

son ouvrage, les noms des mois sont rapprochés des mois grégoriens, mais le premier mois était celui de décembre. Poma donne ensuite une description des douze mois de l'année en fonction des activités agricoles (tableau 1 et figures 6 et 7).

N° mois inca	Nom	Fête	Travaux	Durée	Correspondance approximative
2	*Capac Raymi,* *La grande fête*	*samay killa* *Mois du repos*	Maïs, temps des pluies et de creuser la terre	30	Janvier
3	*Hatun Pucuy* *Grande maturité*	*Pawqar Waray Killa* *Mois où il faut se vêtir d'habits précieux*	Temps de surveillance du maïs la nuit	29	Février
4	*Pacha Puquy Killa* *Mois de la maturité de la terre*		Temps où il faut chasser les perroquets des champs de maïs	30	Mars
5		*Inca Raymi Killa* *Fête de l'Inca*	Maturité du maïs, à protéger des voleurs	29	Avril
6		*Hatun Kuski* *Mois de la recherche*	*aymuray killa* *Mois des moissons*	30	Mai
7		*Inti Raymi* *Petite fête du Soleil*	*Hawkay Kuski* *Repos de la récolte ; ramassage des pommes de terre*	29	Juin
8	*Chakra rikuy, chakra qunakuy chawa warkum killa* *Mois de l'inspection et de la répartition des terres*	*walla wisa* *Sacrifices* *Sacrifices de 100 lamas noirs*	Cueillette des fruits	30	Juillet
9		*Hayllinmi Ynca* *L'Inca danse le haylli (chant de triomphe)*	*Chakra Yapuy Killa* *Mois des labours*	30	Août
10	*Quya Raymi Killa* *Mois de la fête de la reine*		On sème le maïs	29	Septembre
11	*Uma Raymi Killa* *Mois de la fête principale des origines*		Fête de l'eau, tonte des lamas	30	Octobre
12	*Aya Marcay Killa* *Mois où il faut porter les défunts en procession*		Arrosage des semences	29	Novembre
1	*Capac Inti Raymi* *Grande fête du Soleil*	*Quya Raymi* *Fête de la Lune*	Plantation des pommes de terre et autres tubercules	30	Décembre

***Tableau 1** : mois de l'année d'après Guaman Poma de Ayla.*
Les mots en quechua ont des orthographes variables (voir lexique).

1. Décembre *2. Janvier* *3. Février* *4. Mars* *5. Avril* *6. Mai*

***Fig.6.** Illustrations des mois du calendrier des fêtes selon Guaman.*

1. Décembre *2. Janvier* *3. Février* *4. Mars* *5. Avril* *6. Mai*

***Fig.7.** Les mois et les travaux des champs selon Guaman.*

Conclusions

Il existe des discordances entre les différentes sources et beaucoup de lacunes. Malgré cela, il est possible de tirer quelques notions assez fiables. Les calendriers ne sont pas apparus avec les Incas, leurs prédécesseurs (Ica, Chachapuyas) les utilisaient déjà. Dans leurs processus de centralisation de toutes les activités, les Incas ont utilisé les calendriers comme élément fédérateur des populations andines. Cet élément fédérateur et centralisateur est bien illustré par le système des *ceques* qui ancre le temps dans l'espace andin. Leur division de l'année était double : lunaire pour sa facilité d'utilisation et solaire pour la permanence de l'évolution des saisons. Ces deux calendriers se sont simplement superposés, sans qu'au moment de la conquête espagnole une unification ait été réalisée. Certains chercheurs pensent que ces calendriers étaient encore largement évolutifs lorsque cette culture a été détruite par les européens.

Pour en savoir plus

1-Giulio Magli. On the astronomical content of the sacred landscape of Cusco in Inka times. *Nexus Network Journal. Architecture and mathe-matics.* 2005; 5: 22-32

2-Guaman Poma de Ayla Felipe. Nueva corónica y buen gobierno (1615). http://www.kb.dk/permalink/2006/poma/info/en/frontpage.htm

3-Harvard University, Khipu database project : http://khipukamayuq.fas.harvard.edu

4- Inca Garcilaso de la Vega. *Commentarios reales de los Incas*. Romulo Duenas Cabezas, Lima, 2008 [1609].

5-Laurencich-Minelli Laura, Magli Giulio. A calendar Quipu of the early 17th century and its relatioship with the Inca astronomy.

6-McKim Malville J.. Cosmology in the Inca Empire : Huaca Sanctuaries, State-Supported Pilgrimage, and Astronomy. *Journal of Cosmo-logy,* 2010, Vol 9, 2106-2120.

7-Urton Gary. *Signs of the inka khipu*. University of Texas press, Austin, 2003.

8-Zuidema R. Tom. The Inca calendar, the Ceque system and their representation in Exsul Immeritus. *http://*amsacta.cib.unibo.it/2350/7/Cap2.pdf

9-Zuidema R. Tom. *A quipu calendar from Ica, Peru, with a comparison to the ceque calendar from* Cuzco. Oxford International Conference on Archaeoastronomy, p. 341 – 351

10-Zuidema R. Tom. Pilgrimage and ritual movements in Cuzco and the Inca Empire. *http://www.colorado.edu/Conferences/pilgrimage/papers/Zuidema.html*

11-Ziolkowski M. et Sadowski R.. Ed. *Time and calendars in the Inca Empire.* B.A.R. International series. Oxford 1989.

Petit lexique quechua – français

Allay : labourer.
Aya : défunt.
Aymuray, aimorai : récolte.
Capac, qhapac : grand, roi.
Chakra, chacra : la terre (cultivée).
Chawawarkum killa : aujourd'hui mois de juillet (parfois septembre).
Conacuy, qunakuy : distribution.
Huaca : lieu ou objet sacré.
Hatun, jatun : grand.
Hawkay : repos.
Inca : le seigneur, la tribu qui a dirigé les pays andins. Par extension les populations andines du nord.
Inti : Soleil.
Kamay, camay : commandement, chef, seigneur.
Killa, quya, quilha, coya : la Lune, le mois, la reine.
Kuski : moisson.
Marcay : porter en procession.
Pacha : le monde, la terre, le temps (durée).
Papa : pomme de terre.
Pawqar : ornements.
Puquy, poquoy : murir, maturité.
Pucay : rassasié.
Raymi : fête.
Ripuy, rikuy : s'en aller, inspection.
Samay : se reposer.
Sara, zara : maïs.
Suyu : le pays. Division administrative du terri-toire.
Uma : tête, chef.
Walla : guerrier.
Waray : abondance.
Yapuy : retournement, labour. ■

ARTICLE DE FOND

En relativité tout n'est pas relatif

Étienne Klein, Directeur du LARSIM
(Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière)

Les nouveaux programmes de physique en classe terminale de la série scientifique (B.O. spécial n° 8 du 13 octobre 2011) entrouvrent légèrement la porte à la physique du XX^e^ siècle : celle de Relativité restreinte et de la Théorie quantique. Faute de pouvoir s'appuyer seulement sur un formalisme mathématique que ne possèdent pas les élèves, il revient au professeur de choisir le mode didactique d'approche qui lui semble préférable. Quel que soit ce choix il devient nécessaire d'apprendre à verbaliser l'introduction de ces nouveaux concepts. L'article qui suit devrait y contribuer.

Un tout petit peu d'histoire...

Pour comprendre la genèse et les fondements de la théorie de la relativité restreinte[1], il faut dépasser le contexte de la seule année 1905 et évoquer brièvement l'histoire plus générale de certains concepts fondamentaux. La physique de la fin du dix-neuvième siècle s'appuyait sur deux piliers : la mécanique de Newton d'une part, l'électromagnétisme de Maxwell d'autre part. Chaque théorie semblait exacte, mais leurs principes étaient incompatibles.

La mécanique newtonienne se fonde sur le principe de relativité, énoncé pour la première fois par Giordano Bruno et repris ensuite par Galilée. Qu'est-ce à dire ? Dans un avion se déplaçant à sa vitesse de croisière - Bruno et Galilée ne parlaient pas d'avion, mais de navire - les choses se déroulent de la même façon qu'au sol, lorsque l'avion est à l'arrêt. Par exemple, si une hôtesse laisse échapper de ses mains un verre d'eau, celui-ci tombe exactement de la même façon dans l'avion que si l'incident se produit dans une cafétéria. Plus généralement, aucune expérience de physique ne permet de savoir si l'on se trouve dans l'avion en vol ou à l'arrêt au sol (du moins tant que l'avion se déplace à vitesse constante et en ligne droite). Le mouvement de l'avion est donc "comme rien", pour parler comme Galilée. Une sorte d'équivalence unifie tous les référentiels, puisque les phénomènes physiques y ont la même allure et les lois physiques la même forme. Il n'existe donc pas un référentiel particulier qu'on pourrait distinguer des autres en prétendant qu'il est immobile *dans l'absolu*. En effet, ce référentiel pourra toujours être considéré comme mobile par rapport à d'autres référentiels ayant exactement le même statut que lui. En somme, aucun référentiel ne peut être dit immobile dans l'absolu.

Quant à la théorie de l'électromagnétisme, elle explique que la lumière est constituée d'ondes électromagnétiques. Or une onde, selon la conception d'un savant d'avant 1905, c'est un phénomène qui progresse en faisant vibrer quelque chose du milieu dans lequel il se propage. Dans le cas d'une vague, c'est l'eau qui vibre ou, plus exactement, la surface de l'eau. Dans le cas de la lumière, pensait-on, ce qui vibre, c'est l'"éther". On imaginait donc que l'univers était empli jusque dans ses moindres recoins d'un milieu particulier, l'éther, dont l'existence semblait nécessaire à la propagation de la lumière. Comment ce milieu se conjuguait-il à la matière ? De quoi était-il fait ? Était-il pesant, solide, liquide, élastique ? La théorie électromagnétique ne se hasardait qu'à des réponses bien "vagues", pour le coup : l'éther est sans doute incolore, probablement sans poids... Peu à peu, au cours des dernières années du dix-neuvième siècle, il se trouva dépouillé de presque toutes les propriétés physiques qu'on lui avait attribuées au départ pour n'en conserver qu'une : l'immobilité absolue. L'éther devait être un milieu absolument immobile. Or cette conclusion heurtait de plein fouet le principe de relativité, fondateur de la mécanique, l'autre pilier de la physique…

D'où le dilemme : ou bien on prenait au sérieux l'interprétation de la théorie électromagnétique, et

[1] En 1905, Einstein ne parle pas de "théorie de la relativité", mais de "principe de relativité". En 1906, Max Planck parlera dans une de ses conférences de "théorie relative " (*Relativtheorie*). La première personne à avoir utilisé l'expression "théorie de la relativité" est sans doute le physicien A. H. Bucherer, à la suite de discussions qui eurent lieu après la conférence de Planck. Paul Ehrenfest reprendra cette formule en 1907, dans l'un de ses articles, et Einstein lui-même l'utilisera dans sa réponse à cet article. L'adjectif "restreinte" fut ajouté en 1915, après qu'Einstein ait énoncé sa théorie de la relativité "générale", qui est une nouvelle conceptualisation de la gravitation.

on devait abandonner du même coup le principe de relativité ; ou bien on prenait au sérieux le principe de relativité, et on devait alors affronter le problème de l'éther.
Ce second choix est celui d'Albert Einstein : pour résoudre le problème de l'éther, il proclame tout simplement que l'éther est une entité "superflue", qui pose davantage de problèmes qu'elle n'en résout, et qu'il vaut donc mieux considérer qu'il… n'existe pas ! En conséquence, la propagation de la lumière ne résulte nullement de la mise en branle d'un milieu : elle se produit dans le vide et rien ne vibre à son passage si ce n'est elle-même, plus exactement, les ondes électromagnétiques qui la constituent.

La relativité, une affaire d'invariance

Mais cette mise à mort de l'éther n'est pas sans conséquences. Une fois proclamée, elle oblige Einstein à remanier la formulation galiléenne du principe de relativité, ce qu'il fait à partir d'un second postulat : la vitesse de la lumière (qui est aussi celle des ondes électromagnétiques) demeure invariante lorsqu'on change de référentiel, ce qui implique qu'elle est indépendante de la vitesse de la source de lumière et de la vitesse de l'observateur par rapport à la source. L'espace et le temps en seront pour leurs frais : les longueurs et les durées ne sont plus des quantités absolues, c'est-à-dire indépendantes du référentiel dans lequel elles sont mesurées ou calculées. Mais cela n'implique nullement que "tout soit relatif". Car la théorie de la relativité met en avant des grandeurs qui, telle la vitesse de la lumière dans le vide, sont indépendantes du choix du référentiel. C'est le cas notamment pour ce qu'on appelle "l'intervalle d'espace-temps" entre deux événements.

De quoi s'agit-il ? Envisageons deux référentiels galiléens, R et R'. Les coordonnées qui repèrent un événement dans R sont du type (x, y, z, t). Les trois premières indiquent la position où a lieu l'événement, la quatrième indique l'instant où il se produit. Quant aux coordonnées de ce même événement dans R', elles sont (x', y', z', t').
Considérons deux événements 1 et 2 dans R, de coordonnées (x_1, y_1, z_1, t_1) et (x_2, y_2, z_2, t_2). Dans R, ces coordonnées deviendront respectivement (x'_1, y'_1, z'_1, t'_1) et (x'_2, y'_2, z'_2, t'_2). L'intervalle d'espace-temps entre les événements 1 et 2 est défini dans R par :

$$(\Delta s)^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$$

Dans R', il est donné l'intervalle de la même façon donné par :

$$(\Delta s')^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2 - c^2(t'_2 - t'_1)^2$$

La théorie de la relativité permet d'établir que $(\Delta s)^2$ est égal à $(\Delta s')^2$. Ce résultat est capital. Il signifie que l'intervalle d'espace-temps entre deux événements est indépendant du référentiel galiléen dans lequel il est calculé. Il s'agit d'un "invariant de Lorentz".
On a souvent fait remarquer, à fort juste titre, que la théorie de la relativité était mal nommée[2]. En effet, elle est une théorie non pas des quantités relatives, mais des invariants : elle recherche ce qui dans la nature ne varie pas quand on change de référentiel. Gaston Bachelard l'avait fort bien perçu : "L'histoire des sciences, écrit-il, quand elle est méditée avec les lumières de la science contemporaine, appelle parfois des inversions dans les premières caractérisations d'une doctrine. La relativité est une doctrine de l'absolu. Elle va au-delà des apparences, au-delà des premières apparences bien entendu, mais au-delà surtout de ce qui a pu dominer les apparences dans une pensée antérieure."[3]

Gare aux vulgates

On lit souvent que la théorie de la relativité restreinte établit que "la vitesse d'écoulement du temps dépend de la vitesse de l'observateur". Or cette formule est doublement trompeuse. D'abord parce qu'elle affirme que le temps a une vitesse d'écoulement. Or toute vitesse est une variation - plus précisément une dérivée - par rapport… au temps ! Parler d'une vitesse du temps supposerait donc qu'il y ait une variation du rythme du temps par rapport à ce même rythme, ce qui n'a pas de sens.
Cette formule est également trompeuse par le fait qu'elle laisse entendre qu'il n'existerait qu'un seul temps, le même pour tous, mais "élastique", c'est-à-dire ayant une vitesse d'écoulement qui varierait d'un observateur à l'autre. Quiconque la lit naïvement imaginera donc que s'il lui faut deux heures pour lire un livre dans sa chambre, il lui faudra un temps différent, mesuré par sa montre, pour lire un livre de même taille dans une fusée qui le propulserait dans l'espace à 150 000 kilomètres

[2] Selon le physicien Olivier Costa de Beauregard, le titre de "théorie de l'absolu sous-tendant les apparences" serait "incomparablement plus satisfaisant" (O. Costa de Beauregard, *Archives de philosophie*, avril 1956, p. 25.).

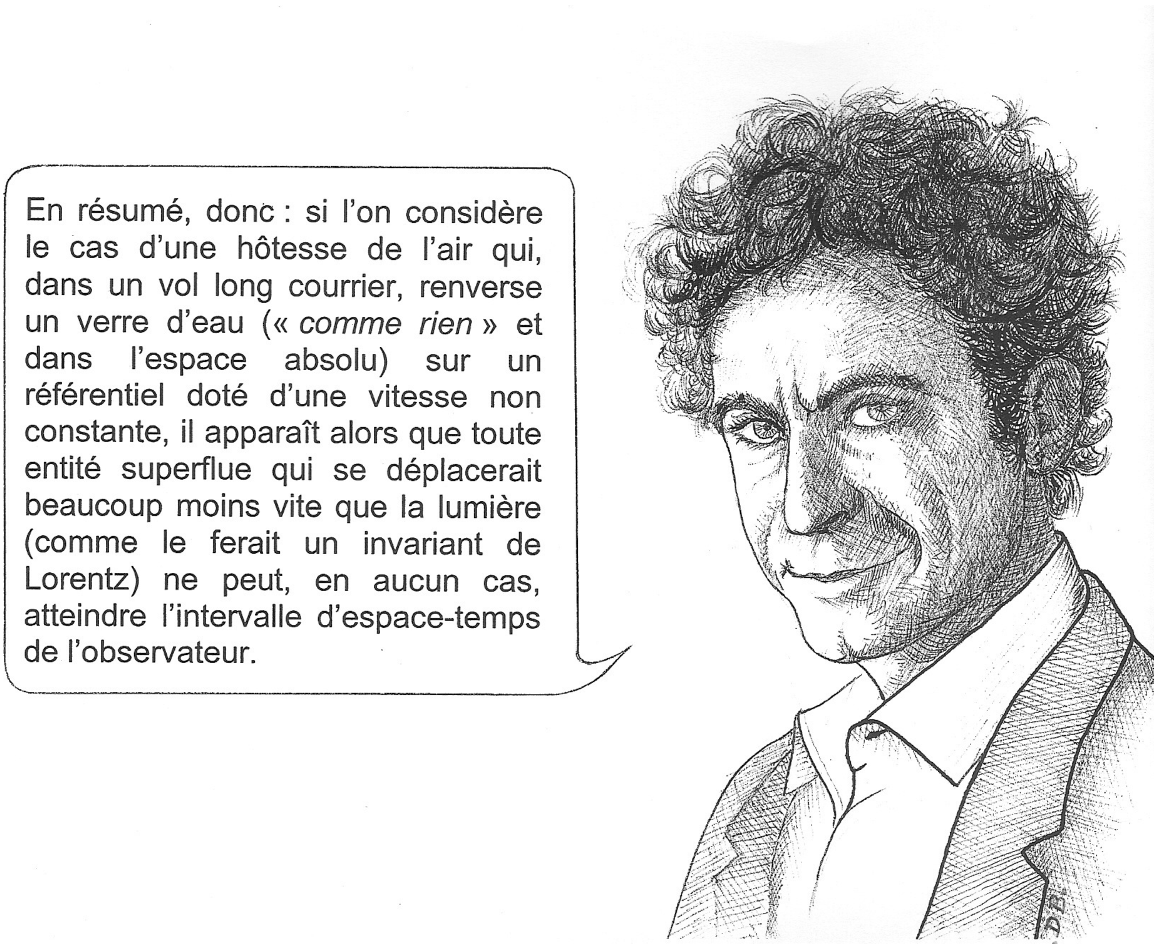
[3] Gaston Bachelard, "Le nouvel esprit scientifique", in *L'engagement rationaliste,* Paris, PUF, 1972, p. 96-97.

par seconde. Or ce n'est pas le cas : il lui faudra là encore deux heures pour achever la lecture de son ouvrage… Car rappelons-nous : "Le mouvement est comme rien", disait Galilée, repris sur ce point par Einstein : quand un observateur est en mouvement rectiligne et uniforme, tout se passe comme s'il n'était pas en mouvement… Mais la différence d'avec la physique newtonienne, c'est que lorsqu'il reviendra de son voyage, sa montre ne sera plus synchronisée avec celle de ceux qui sont restés sur Terre [3] … Car selon la théorie d'Einstein, chaque observateur est doté d'un "temps propre" qui, comme son nom l'indique, lui est propre. Dans ce cadre, changer de référentiel, c'est-à-dire passer du point de vue d'un observateur à celui d'un autre observateur, ce n'est ni diminuer ni augmenter la vitesse d'un temps unique qui serait commun aux deux, mais tout bonnement passer d'un temps propre particulier à un autre temps propre, radicalement distinct du précédent, et sans que l'on puisse dire que l'un s'écoule plus rapidement que l'autre. En d'autres termes, en théorie de la relativité, ce qui est universel, ce n'est plus le temps lui-même, mais le fait que tout observateur en possède un qui lui est propre.

[3] En 1911, le physicien Paul Langevin a popularisé cette conséquence de la théorie de la relativité. Considérons deux frères jumeaux âgés de 20 ans. L'un d'eux part explorer le cosmos à bord d'une fusée. Il effectue un aller-retour, à la vitesse constante de 297000 km/s (99 % de la vitesse de la lumière) vers une planète située à 20 années-lumière. À son retour, le jumeau voyageur lit sur sa propre montre qu'il est parti six ans, alors que son frère resté sur terre a vieilli de quarante ans. Le jumeau sédentaire est donc devenu plus âgé que son frère, phénomène qu'on interprète couramment – mais à tort – en disant que le temps s'est écoulé pour l'un plus rapidement que pour l'autre.

■

Et pour sourire, un clin d'œil de notre ami Daniel Bardin !



ARTICLE DE FOND

L'unité astronomique (UA) ou comment mesurer l'Univers ?

Jean-Eudes Arlot,
astronome, ancien directeur de l' Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides

Le passage de Vénus du 6 juin 2012 nous rappelle la longue quête des astronomes pour mesurer les distances dans le système solaire et au-delà. C'est l'occasion de revenir sur une unité de mesure particulière, l'unité astronomique.

Qu'est-ce que l'UA?

La mesure de la distance de la Lune, des planètes du système solaire et aussi des étoiles et des objets les plus lointains est une quête de l'humanité depuis la plus haute antiquité. En observant le ciel, comment ne pas se poser la question : à quelle distance se trouvent les astres que j'aperçois dans le ciel ? Sont-ils tous aussi éloignés de nous, situés sur une sphère, dite "céleste" ? Et aussi : quelle est la taille de l'Univers ? Pour répondre à ces questions, il faut se fixer des unités. L'utilisation directe du mètre ou du kilomètre n'est pas la meilleure méthode : l'astronome mesure des angles sur le ciel, jamais directement des distances. En fait, aujourd'hui, on est capable de mesurer quelques distances directement : la distance Terre-Lune par laser et la distance entre la Terre et un corps proche tel un astéroïde géocroiseur[1] ou bien la planète Mars par radar mais c'est tout. Impossible de mesurer directement une autre distance.

Revenons à l'antiquité : comment faire de telles mesures ? On connaît, bien entendu, le principe de la triangulation (figure 1) qui permet de mesurer une distance "de loin", sans "y aller", mais la base du triangle doit être la plus grande possible. Pour les astres du ciel, on prendra donc le rayon terrestre comme base. Les astronomes nomment ce principe, la parallaxe puisque l'angle de visée d'un astre proche change avec la position de l'observateur.

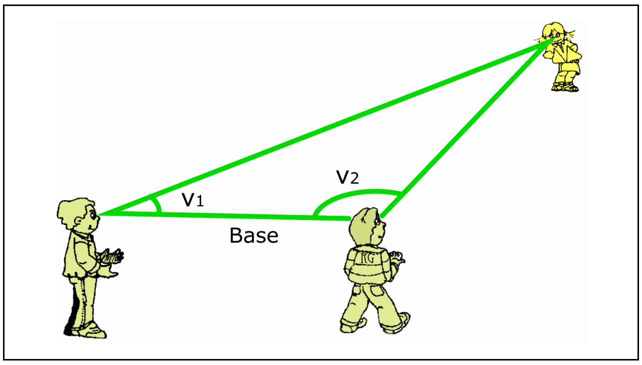


Fig.1. *Principe de la triangulation, permettant de déterminer une distance en mesurant des angles. C'est une méthode couramment appliquée par les géomètres et connue depuis l'antiquité. Connaissant la longueur de la base et les deux angles v1 et v2, la géométrie du triangle permet de calculer les deux autres distances*

Ainsi, la distance à tel ou tel corps ne s'exprimera pas en kilomètres, mais en angle : la ***parallaxe horizontale*** qui est la valeur maximale du changement d'angle de visée du même astre selon le site d'observation terrestre (elle est dite horizontale car maximale lorsque l'astre est à l'horizon, cf. figure 2). Pour exprimer la distance Terre-Jupiter, on dira : la parallaxe horizontale de Jupiter est de tel angle, ce qui signifie que depuis Jupiter, le rayon terrestre est vu sous un tel angle. Cette parallaxe, qui indique la distance d'un astre à la Terre, est donc l'angle sous lequel on voit le rayon terrestre depuis cet astre. La distance est donnée sous forme d'angle et l'unité est le rayon terrestre. Ces parallaxes dépendant de la rotation de la Terre autour de son axe, on les appelle ***parallaxes diurnes*** (figure 2).

[1] Astéroïde dont l'orbite croise celle de la Terre ou s'en approche fortement. Les astéroïdes géocroiseurs orbitent autour du Soleil avec une excentricité plus forte que celle des planètes.

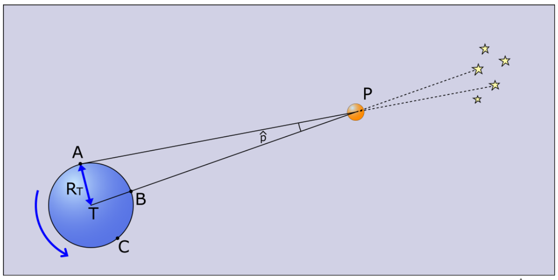


Fig.2. *Parallaxe diurne d'une planète. C'est l'angle p̂ sous lequel on verrait le rayon terrestre depuis la planète P. Pour la mesurer, on observe au même moment la position de la planète devant le fond d'étoiles depuis deux points éloignés, A et B par exemple.*
On utilise le terme de parallaxe diurne car la rotation de la Terre ferait passer un observateur de B à A (les observations doivent pourtant être simultanées). Il ne faut pas la confondre avec la parallaxe annuelle des étoiles (figure 6).

Ératosthène a mesuré, le premier, le rayon terrestre et, jusqu'à aujourd'hui, on a amélioré régulièrement la détermination de ce rayon. À chaque fois que l'on modifiait cette valeur, on modifiait en même temps toutes les distances données par des parallaxes.

Bien que la distance Terre-Soleil soit la plus intéressante, ce n'est pas par là que l'on a commencé, la parallaxe du Soleil étant très difficile à mesurer.

Pourtant la distance au Soleil est fondamentale : elle va jouer le même rôle que le rayon terrestre pour la mesure des distances aux étoiles.
Ces distances sont incroyablement plus grandes que les distances dans le système solaire et le rayon terrestre bien trop petit pour servir de base à une triangulation. Il va falloir agrandir la base et on va utiliser le rayon de l'orbite terrestre : une observation faite à différentes positions de la Terre sur son orbite va permettre de calculer une parallaxe pour chaque étoile. La distance d'une étoile à la Terre sera donnée par sa parallaxe (ici appelée **parallaxe annuelle** puisqu'elle utilise le mouvement annuel de la Terre). Cette parallaxe est donc l'angle sous lequel on voit le rayon de l'orbite terrestre depuis l'étoile.

On comprend bien que dans ce cas, le rayon de l'orbite de la Terre devienne une unité fondamentale pour la mesure des distances aux étoiles et astres lointains. Ce sera l' "unité astronomique". Mais comment la mesurer ? D'autant plus que l'on a vu que la distance au Soleil n'est pas mesurable directement… Il faudra près de 20 siècles pour y arriver.

Comment mesurer l'UA?

Les tentatives

La distance Soleil-Terre est donc une unité de distance et connaître cette distance est une question qui a motivé tous les astronomes depuis l'antiquité. Cet astre qui éclaire et entretient la vie, comment est-il fait (la réponse n'arrivera qu'au XX^{e} siècle), à quelle distance de la Terre se trouve-t-il ? Si la distance de la Lune est vite déterminée grâce aux éclipses, celle du Soleil est beaucoup plus difficile à évaluer. On l'a vu, la notion de triangulation ou de parallaxe est connue des astronomes-géomètres de l'antiquité mais délicate à l'époque à mettre en œuvre. Avant d'effectuer une mesure, il faut savoir ce que l'on va mesurer : il faut un modèle d'univers : forme des astres, positions relatives, mouvements relatifs… Les observations confirment ou non la théorie et l'on itère le processus avec plus de précision, avançant peu à peu vers un modèle décrivant mieux ce qu'on observe.

La mesure du rayon terrestre par Ératosthène (–276, –194) est très bien connue[2] , mais qu'en est-il de la mesure de la distance au Soleil ? Anaxagore (–499, –427) avait estimé le rayon du Soleil à une cinquantaine de kilomètres. Effectivement, si on applique le raisonnement d'Ératosthène à une Terre plate, alors, on trouve que le Soleil se trouve à 6 300 kilomètres de la Terre (figure 3).

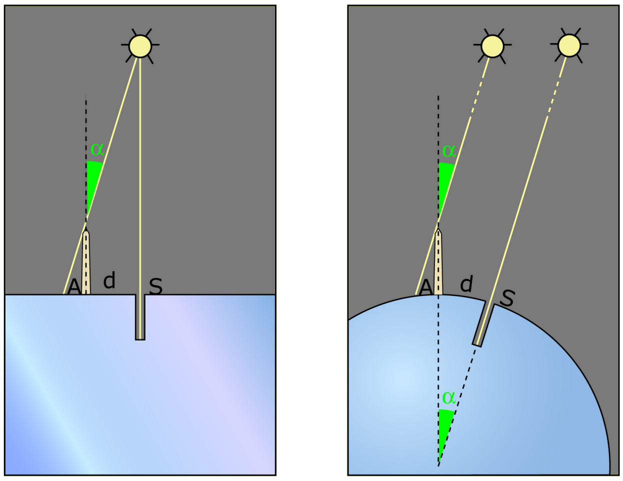


Fig.3. *Une même observation peut fournir deux données très différentes : le Soleil à 6 300 km de la Terre si celle-ci est supposée plate et un rayon terrestre de 6 300 km si la Terre est supposée sphérique et le Soleil très loin.*

Étant donné que son diamètre apparent est d'un demi-degré, on calcule aisément que son rayon est de 55 kilomètres ! Ainsi, une même observation peut conduire à des résultats complètement différents selon le modèle d'univers utilisé…

En fait c'est Aristarque de Samos (–310, –230) qui, après avoir mesuré la distance Terre-Lune grâce aux éclipses, tente une mesure de la distance Terre-

[2] Voir par exemple sur le site du CLEA http://acces.ens-lyon.fr/clea/lunap dans l'Univers observé / mesure du rayon de la Terre.

Soleil en observant la Lune à son quartier : dans cette configuration, le triangle Terre Lune Soleil est un triangle rectangle à la Lune dont il suffit de mesurer l'angle entre le Soleil et la Lune depuis la Terre (figure 4). Hélas, une telle mesure est très difficile à cette époque et Aristarque trouve 7 millions de kilomètres du fait d'une mesure d'angle erronée. Une erreur d'un facteur 20 !

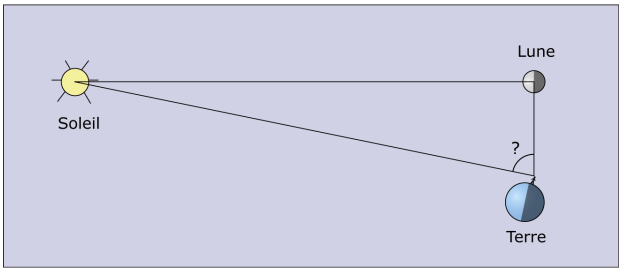


Fig.4. *Principe de la mesure de la distance du Soleil par Aristarque. Au premier quartier, l'angle Terre Lune Soleil est droit. Si on connaît la distance de la Lune et si on mesure l'angle Lune Terre Soleil, on peut calculer la distance du Soleil. L'angle vaut 89,85° très proche d'un angle droit, alors qu'Aristarque avait trouvé 87°.*

Une fois encore, il faudra attendre que l'on trouve un modèle d'univers adéquat pour pouvoir mesurer correctement la distance du Soleil. Cela arrivera 19 siècles plus tard, avec Kepler et ses fameuses lois. Des lois qui n'en sont pas, ce sont seulement des constatations ne reposant sur aucune démonstration.
Pourquoi avoir attendu si longtemps pour trouver, somme toute, quelque chose de simple reliant le mouvement des planètes du système solaire ? C'est tout d'abord parce que le système de Ptolémée, qui ne permet pas de déterminer facilement la distance Terre-Soleil, permet de prédire assez bien le mouvement des planètes : ainsi, pourquoi chercher autre chose ? C'est aussi parce qu'il n'y a pas d'observateurs sérieux du mouvement des astres. Depuis Hipparque (–190, –120) dont les observations vont servir à Ptolémée (90-168), personne n'a vraiment observé les planètes, jusqu'à Tycho-Brahé (1546-1601) qui réalise des séries continues d'observations très précises pour l'époque. Kepler (1571-1630) va utiliser ces observations pour tenter de comprendre quelles règles régissent le mouvement des planètes et ainsi publier ses « lois ». L'une d'elles va donner la solution pour la mesure de la distance Terre-Soleil : le cube du demi-grand axe de l'orbite d'une planète (en général très proche de la distance au Soleil) divisé par le carré de sa période de révolution autour du Soleil est une constante pour toutes les planètes du système solaire. ***Il suffit donc de mesurer une seule distance*** dans le système solaire pour les calculer toutes si on connaît les périodes de révolution, elles-mêmes faciles à mesurer. Ainsi, même si le Soleil est loin et difficile à observer, on va pouvoir tenter de mesurer la distance à Mars ou Vénus qui sont, elles, plus proches de la Terre. Là encore, on voit que l'UA est aussi une unité importante. Si sa valeur est fausse alors toutes les distances dans le système solaire seront fausses puisque se calculant désormais à partir d'une seule.

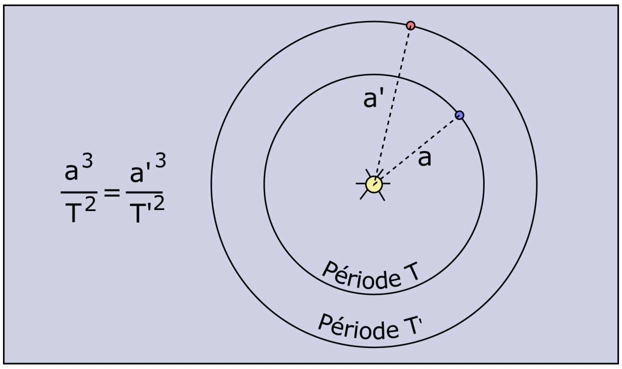


Fig.5. *La troisième loi de Kepler relie la période de révolution T d'une planète au demi-grand axe a de son orbite (soit approximativement sa distance au Soleil).*

Kepler ne dispose d'aucun modèle fiable de mouvement des planètes. Même s'il privilégie le principe copernicien par rapport à celui de Ptolémée (le principe géocentrique de Ptolémée et les trajectoires circulaires de Copernic ne permettent pas de faire de bonnes éphémérides), il ne dispose que des observations de Tycho Brahé qui lui prouvent que ces modèles ne sont pas bons. Kepler énonce sa "troisième loi" en 1618 après 20 ans de recherches et de tâtonnement : il donnera de bonnes valeurs relatives des distances des planètes au Soleil, mais ne pourra déterminer correctement la distance Terre-Soleil (il l'évaluera à un peu plus de 20 millions de kilomètres à partir d'hypothèses fausses).
Les astronomes vont tout d'abord vérifier ces fameuses lois. Ainsi, si Kepler a raison, les planètes Mercure et Vénus doivent passer entre la Terre et le Soleil, et même, de temps en temps, passer devant le disque du Soleil avec une périodicité que l'on peut prévoir. En utilisant le modèle de Kepler, les planètes Mercure et Vénus doivent passer devant le Soleil en 1631. Gassendi (1592-1655) observera le passage de Mercure mais pas celui de Vénus qui aura lieu durant la nuit ! Pas de Soleil, pas de passage de Vénus ! Un autre passage de Vénus est prévu pour 1639 et c'est un anglais, Horrocks (1618-1641) qui, n'ayant pas confiance dans les calculs des autres astronomes, recalculera (il a alors 20 ans et mourra à 22 ans) le moment du passage de Vénus et qui l'observera. Ses travaux ne nous sont pas parvenus, mais il a cependant évalué la distance Terre-Soleil à environ 94 millions de kilomètres. Il

n'utilisera pas le principe de la parallaxe, mais le fait que le diamètre apparent des planètes vues du Soleil doit être le même pour toutes les planètes ! Encore une hypothèse fausse…

Afin de déterminer cette distance Terre-Soleil, Jean-Dominique Cassini (1625-1712) va mesurer la parallaxe de la planète Mars. Pour cela, des observations sont réalisées à Paris et à Cayenne en 1671[3]. Bien que Cassini soit un très bon astrométriste, la mesure est difficile parce que la position de Mars doit être repérée par rapport à des étoiles de référence et que les catalogues d'étoiles sont plutôt pauvres à cette époque. Cassini évaluera cependant la distance Terre Soleil à 135 millions de kilomètres environ. C'est tout de même une bonne performance.

En 1677, Halley (1656-1742) observe un passage de Mercure devant le Soleil et constate que, finalement, ces observations sont plus faciles à faire que des mesures de positions sur un fond d'étoiles. Un passage observé depuis différents lieux sur Terre est vu différemment : sa durée totale varie d'un lieu à l'autre par l'effet de la parallaxe. La détermination de la distance Soleil-Terre peut se faire plus facilement de cette manière en utilisant les passages de la planète Vénus, plus proche de la Terre et plus grosse que Mercure. Malheureusement pour Halley, ces passages sont rares et les prochains auront lieu en 1761 et 1769.

Il se sera alors écoulé près de 150 ans depuis Kepler : la mécanique céleste a progressé, Newton (1643-1727) a énoncé son principe de la gravitation qui démontre les lois de Kepler. La communauté scientifique va s'enthousiasmer pour cette mesure de la distance Terre-Soleil grâce aux passages de Vénus devant le Soleil et ce sera la mobilisation générale. La population s'intéresse aussi à cette observation, car on va mesurer l'Univers ! Ces passages ne seront bien observables que loin de l'Europe et entraîneront des voyages épiques des astronomes. Si le passage de 1761 est un peu décevant (on n'a pas l'expérience de cette observation), celui de 1769 sera plus réussi et la distance Terre-Soleil sera évaluée à 151 millions de kilomètres (voir ***le tableau*** des différentes estimations de la distance Terre-Soleil).

On a alors une estimation assez bonne de l'unité astronomique, mais il faut encore l'améliorer. Les prochains passages de Vénus vont avoir lieu en 1874 et 1882. La technique s'est considérablement améliorée, on connaît le télégraphe et le bateau à vapeur, et les États vont financer encore des expéditions pour des observations. Cependant, des astronomes ne sont pas persuadés que cette technique soit encore valable. Les observations sont limitées en précisions du fait de la nature du bord du Soleil et de son diamètre imprécis. Et surtout le XIX^e^ siècle est le siècle de la découverte des astéroïdes dont certains passent plus près de la Terre que Mars ou Vénus. Leur parallaxe est donc beaucoup plus facile à mesurer et les lois de Kepler permettront toujours de calculer la distance Terre-Soleil à partir de la distance de n'importe quel astéroïde tournant autour du Soleil. Les astéroïdes Flora et Éros seront observés lors de leur passage près de la Terre. La progression de la qualité des catalogues d'étoiles de référence permettra de mesurer précisément leur parallaxe ainsi que celle de Mars. Les résultats des campagnes d'observation des passages de Vénus donneront cependant de bons résultats du fait du cumul de nombreuses observations. Mais l'avenir ne sera plus dans cette technique.

Au XX^e^ siècle, l'astéroïde Éros servira à la détermination de l'unité astronomique jusqu'à l'apparition des radars qui donneront directement, en 1970, la distance Terre-Mars avec une haute précision. L'utilisation des sondes posées sur Mars sera même encore plus précise, il suffit de mesurer le temps de communication avec elles. En 2004, le passage de Vénus servira à une opération pédagogique internationale. Des observations seront faites en grand nombre dans les lycées, collèges et dans les associations d'amateurs. Surprise : les résultats seront meilleurs que prévus grâce à la qualité des instruments, à l'usage du GPS et de caméras vidéo pour enregistrer le phénomène.

L'unité astronomique aujourd'hui

On a bien vu l'intérêt de mesurer la distance Terre-Soleil, aussi bien comme unité de mesure du système solaire, que comme base pour déterminer la distance des étoiles et objets lointains. La distance Terre-Soleil se mesure aujourd'hui grâce à la planète Mars ou plutôt grâce aux sondes posées sur la planète Mars dont il est facile de mesurer la distance à la Terre puisque ces sondes peuvent nous "répondre". Les lois de la mécanique céleste permettent de faire les calculs. Avec les mesures et les calculs précis que permettent les techniques d'aujourd'hui, de nombreux problèmes ont été soulevés. Tout d'abord, ce ne sont plus tout à fait les lois de Kepler que l'on applique, même si le principe qui dit que "si on connaît une distance dans le système solaire, on les connaît toutes" reste toujours vrai. Pour bien définir l'unité astrono-

[3] NDLR : Voir l'article sur cette mesure à la page 18

mique, il y a maintenant de nombreux problèmes à prendre en compte et à résoudre.

La distance Terre-Soleil varie pour de nombreuses raisons. L'orbite terrestre est excentrique (c'est une ellipse) mais la définition du demi-grand axe qui caractérise l'ellipse est claire et sans ambiguïté. L'orbite terrestre varie sous l'influence des autres planètes et donc l'ellipse ne reste pas constante : son demi-grand axe augmente régulièrement (de 15 mètres par siècle environ). De plus, ce n'est pas la Terre, mais le centre de gravité du système Terre-Lune qui décrit une ellipse autour du Soleil. Et encore, ce n'est pas autour du Soleil mais autour du centre de masse du système solaire ! On peut donc, à un instant donné, déterminer les caractéristiques dynamiques du système Terre-Lune-Soleil perturbé par les autres planètes, mais quelle constante choisir comme "unité" ?

Cette distance Terre-Soleil, comme celle des autres planètes, dépend de la fameuse constante pour tout le système solaire décrite par Kepler. La loi de la gravitation nous donne la valeur de cette constante : c'est la masse du corps central multiplié par la "constante de la gravitation". Cette constante est bien difficile à déterminer puisque toujours liée à une masse.

Ainsi, la ***définition actuelle de l'unité astronomique*** va être associée à un corps fictif sans masse qui tourne autour du Soleil de façon à ce que les changements dans le mouvement de la Terre, n'affectent pas l'unité astronomique. Cette définition a pour but d'avoir des distances relatives précises dans le système solaire là où des distances absolues sont plus difficiles à mesurer.

Définition de l'unité astronomique (UAI 1976)

C'est le demi-grand axe d'une orbite que décrirait autour du Soleil une planète de masse négligeable, non perturbée, dont le moyen mouvement est égal à k radians par jour, k étant la constante de Gauss, les unités de temps et de masse étant comme suit.

k = 0,985 607 668 601 425 degré/jour
unité de temps : le jour, égal à 86400 secondes du Système International.
unité de masse : la masse du Soleil 1,9889 x 10^{30} kg (1992).
G constante de la gravitation universelle = 6,672 59 x 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^2

En 1992, on a comme meilleure valeur :

1 UA = 1,495 978 7061 × 10^{11} m.

Mesurer l'univers

Pour terminer, voyons comment l'unité astronomique (l'UA), qui est l'unité de mesure du système solaire, est bien aussi l'unité de mesure de l'univers. Comme nous l'avons vu, le principe de la parallaxe est le seul qui nous permette de mesurer la distance des objets lointains. La parallaxe annuelle, élargissant la base de triangulation à l'orbite terrestre (donc à l'unité astronomique), permet de mesurer la distance de quelques étoiles. On dira qu'une étoile se trouve à un parsec de la Terre si sa parallaxe est d'une seconde de degré, c'est-à-dire que le rayon de l'orbite terrestre (une UA) est vu sous un angle d'une seconde de degré depuis l'étoile (deux parsecs ➔ angle d'une demi-seconde, etc). En fait, très peu d'étoiles sont accessibles avec cette méthode tellement les angles sont petits. Mille parsecs correspondent à un angle d'un millième de seconde de degré, à la limite de la mesure.

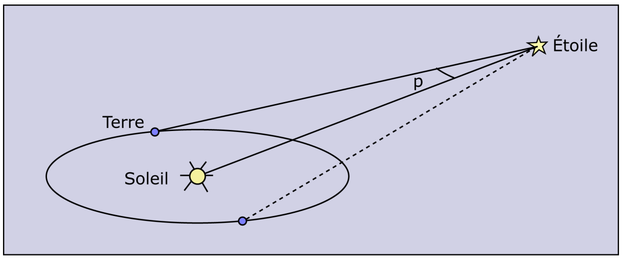


***Fig.6**. Parallaxe annuelle d'une étoile. C'est l'angle $\hat{p}$ sous lequel on verrait le rayon de l'orbite terrestre (donc 1 UA) depuis cette étoile. Si cette parallaxe vaut 1" (une seconde d'arc), l'étoile est située à 1 parsec.*

On peut convertir les parsecs en "années-lumière" plus couramment utilisées : mille parsecs correspondent à un peu plus de 3000 années-lumière, une distance bien faible par rapport à la taille de notre galaxie, la Voie Lactée (100 000 années-lumière) sans parler des galaxies lointaines situées à plusieurs milliards d'années-lumière. Le satellite d'observation "Gaia" qui va être lancé en 2013 doit pouvoir mesurer des parallaxes de l'ordre de quelques microsecondes de degré et donc mesurer des distances jusqu'à 10 000 parsecs soit 30 000 années-lumière. Comment mesurer alors les grandes distances ? On va utiliser les "chandelles cosmiques" ou "chandelles standard". Ce sont des objets dont on connaît parfaitement la luminosité intrinsèque, si bien que leur distance dépendra de leur luminosité.

Il suffit donc de connaître la distance à la Terre d'un de ces objets par sa parallaxe et le tour est joué, de proche en proche, on peut atteindre des distances très grandes. La classification des étoiles en a été le premier pas. Il y a aussi les étoiles variables dites "Céphéides" que l'on peut même observer dans d'autres galaxies, ce qui nous a donné la distance des galaxies proches, puis les supernovae, ces étoiles en fin de vie qui voient leur éclat augmenter d'un facteur de plusieurs dizaines de millions… Enfin, pour les galaxies très éloignées, on va utiliser l'expansion de l'Univers qui « rougit » les objets en fonction de leur distance. Ce n'est pas vrai pour les objets et galaxies proches mais vérifié pour les galaxies lointaines.

En conclusion

Une unité simple, comme la distance Terre-Soleil, devient plus difficile à définir dès que l'on étudie avec plus de précision le mouvement de la Terre. L' "unité astronomique" est définie (voir encadré) comme une unité astronomique de base puisqu'il n'était pas possible de mesurer des distances astronomiques absolues avec un mètre. Cela devient moins vrai depuis les mesures directes de la distance de Mars par radar ou par les sondes spatiales.

La constante primaire est la constante de la gravitation universelle G et l'unité astronomique en est dérivée. Le produit GM où M est la masse du Soleil est la quantité observable. Quand la technique et la précision évoluent, une telle unité indépendante n'est plus obligatoirement utile et on fixe alors cette unité par rapport à une autre, le mètre, unité de base du Système International. C'est ce qui risque d'arriver à l'unité astronomique en 2012 où l'Union Astronomique Internationale (UAI) projette de fixer définitivement l'UA à 149 597 870 700 mètres et d'abandonner la constante de Gauss k.

Époque	Unité astronomique en km	Différence à la valeur de référence	Méthode
vers – 450 ?	6300	149 591 871	Triangulation avant Ératosthène
vers – 300 ?	7 000 000	142 597 871	Avec la Lune : Aristarque de Samos
vers 1600 ?	2 000 000	147 597 871	Kepler
1639	94 000 000	55 597 871	Avec le passage de Vénus: Horrocks
1672	135 000 000	14 597 871	Cassini avec la parallaxe de Mars
1761	138 540 000	11 057 871	Pingré et Short avec un passage de Vénus
1761 & 1769	151 000 000	1 402 129	Lalande et Pingré avec deux passages de Vénus
1862	149 000 000	597 871	Parallaxe de Mars
1875	148 000 000	1 597 871	Parallaxe de Flora
1874 & 1882	149 670 000	72 129	Newcomb avec tous les passages de Vénus
1885	150 000 000	402 129	Parallaxe de Mars
1900	149 400 000	197 871	Parallaxe d'Éros
1930	149 700 000	102 129	Parallaxe Éros
1970	149 597 800	71	Tirs radar sur Mars
1992	149 597 870,61	< 1 km	Mars : sonde Viking + radar
2000	149 597 870,691	valeur de référence	Mars : sonde Viking + radar
2004	149 608 708	10 838	Passage de Vénus : "VT-2004"
après 2012 ?	149 597 870,700	< 1 km	Valeur arbitraire de définition

Tableau des mesures de l'unité astronomique.

■

HISTOIRE

Cassini et Richer

« Recherche de la parallaxe du Soleil par le moyen de celle de Mars observé à mesme temps à Paris & en Caïenne »

Béatrice Sandré

Les livres d'histoire de l'astronomie nous enseignent que Cassini et Richer ont été les premiers à mesurer la parallaxe de Mars. Mais comment ont-ils fait ? Béatrice Sandré nous permet ici de rentrer dans le détail de leurs calculs et nous fait entrevoir la complexité de leur tâche.

Depuis les mesures de Tycho Brahe et les calculs de Kepler (voir CC n° 118 été 2007), on connaît à chaque instant les positions relatives du Soleil, de la Terre et des cinq planètes et donc les distances Terre planètes, mais dans une unité inconnue, la distance moyenne de la Terre au Soleil appelée unité astronomique (ua).

Cassini savait par exemple qu'en septembre 1672 la planète Mars serait très près de l'opposition mais aussi de son périgée (comme en août 2003) et que la distance Terre Mars serait minimale et égale à 3/8 de l'unité astronomique. Il profite de cette occasion pour déterminer la parallaxe de Mars et en déduire la valeur de l'unité astronomique.

Pour réaliser cette mesure, il faut observer les positions de Mars par rapport aux étoiles beaucoup plus lointaines, au même instant et depuis deux points très distants. Cassini reste à Paris et envoie son collègue Richer à l'île de Cayenne.

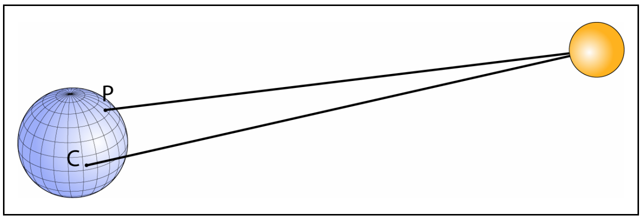


***Fig.1**. Pour déterminer la distance de Mars, on vise la planète depuis Paris et Cayenne.*

Différence des méridiens entre Paris et Cayenne

Pour déterminer la parallaxe de Mars à partir des observations faites depuis Paris et Cayenne, il est nécessaire de connaître avec un maximum de précision l'écart entre les latitudes ainsi que l'écart entre les longitudes de Paris et Cayenne.

À l'époque de Cassini, on est capable de mesurer très précisément des latitudes mais la mesure de la longitude (qui est un décalage horaire) est beaucoup plus délicate : on ne sait pas embarquer d'horloge sur un navire. Cette mesure est réalisée par plusieurs méthodes ce qui va permettre d'évaluer l'incertitude sur le résultat.

Cassini et Richer observent le commencement de l'éclipse de Lune du 7 novembre 1672 [1]

5 h 15 min 40 s à Paris

et 1 h 47 min 12 s à Cayenne

L'écart en longitude serait de 3 h 28 min 28 s (ou 52,12°).

Ils observent la conjonction de Io et Jupiter dans la nuit du 1er au 2 avril 1672

24 h 43 min 3 s à Paris

et 21 h 16 min 30 s à Cayenne

L'écart en longitude serait de 3 h 26 min 27 s (ou 51,61°).

Ils mesurent les hauteurs méridiennes du Soleil à Paris et à Cayenne le 22 septembre 1672, jour de l'équinoxe d'automne et le 20 mars 1673, jour de l'équinoxe de printemps. Ils en déduisent un écart en longitude de 3 h 42 min[2].

Cassini regrette que le retour prématuré de Richer à cause de sa maladie n'ait pas permis de mesurer ce décalage horaire par observation des immersions ou des émersions des satellites de Jupiter dans son ombre. Il précise cependant qu'il a été mesuré par plusieurs autres méthodes et que l'ensemble donne une moyenne de 3 h 39 min avec une incertitude de l'ordre de 10 min.

---

[1] Il y a dans le texte de Cassini une erreur de date puisque l'éclipse de Lune a eu lieu le 7 septembre 1672 et non le 7 novembre 1672.

[2] La méthode de Cassini n'est pas simple. Elle utilise la variation de déclinaison du Soleil considérée proportionnelle au temps au moment des équinoxes. Les abonnés numériques trouveront le détail des calculs sur le site.

La parallaxe de Mars

Richer et Cassini observent donc la planète Mars depuis Paris et Cayenne pendant le mois de septembre 1672. Elle passera à proximité d'une étoile du Verseau notée Ψ^1 Aquarii dans le catalogue de Bayer (figure 2).

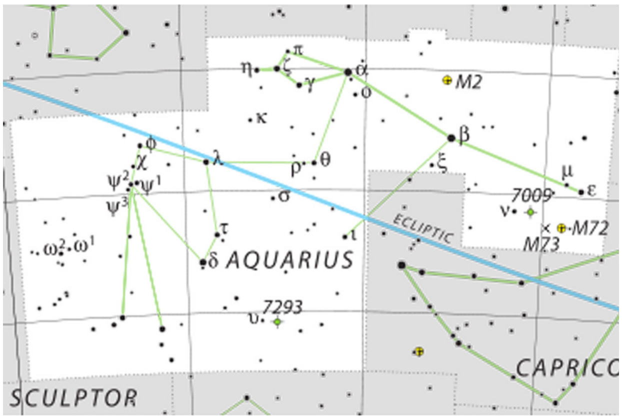


***Fig.2**. Cassini et Richer ont observé Mars en septembre 1672 dans cette région du ciel, à proximité de l'étoile ψ^1 du Verseau.*

Pour préciser les positions des astres, ils mesurent leurs hauteurs méridiennes, c'est-à-dire leurs hauteurs au dessus de l'horizon lorsqu'ils passent dans le plan du méridien plein sud. La hauteur méridienne est la hauteur maximale de l'astre au cours du mouvement diurne (figure 3).

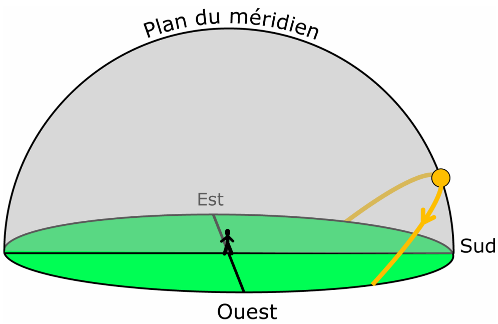


***Fig.3**. Un astre culmine lorsqu'il traverse le plan du méridien.*

hauteur méridienne	Ψ^1 Aquarii	Mars (bord supérieur)
Cayenne le 4 septembre	74° 12' 40"	74° 48' 55"
Cayenne le 5 septembre	74° 12' 40"	74° 44' 20"
Paris le 5 septembre	30° 19' 45"	30° 51' 55"

Mais Mars passe dans le méridien de Cayenne 3 h 39 min après être passé dans le méridien de Paris. Les deux observations ne sont pas simultanées et entre temps, la déclinaison de Mars varie. Une correction sur la hauteur méridienne de Mars est donc nécessaire. Et c'est pour la calculer par interpolation linéaire que Richer a dû faire les mesures de hauteur méridienne de Mars deux jours consécutifs (les 4 et 5 septembre).

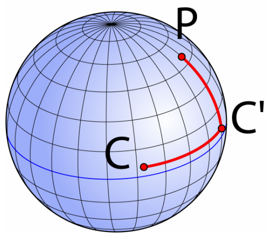


***Fig.4.** Le point C'est à la latitude de C (Cayenne) et à la longitude de P (Paris). Cassini utilise deux observations simultanées de Mars, l'une depuis P, l'autre depuis C'.*

Les résultats précédents montrent qu'entre le 4 et le 5 septembre 1672, la hauteur méridienne de Mars à Cayenne a diminué de 4' 35". Cassini en déduit que le 5 septembre, au point C' de la Terre situé à la latitude de Cayenne mais à la longitude de Paris la hauteur méridienne de Mars était :

$$74°\,44'\,20" + 4'\,35" \times \frac{3\text{h}\,39\,\text{min}}{24\text{h}} = 74°\,45'\,02"$$

L'écart entre les hauteurs méridiennes de Ψ^1 Aquarii et de Mars le 5 septembre au point C'est donc :

$$74°\,45'\,02" - 74°\,12'\,45" = 32'\,22"$$

À Paris, l'écart entre les hauteurs méridiennes de Ψ^1 Aquarii et de Mars est :

$$30°\,51'\,55" - 30°\,19'\,45" = 32'\,10"$$

Soit un écart angulaire $\alpha = 12"$.

Quand Mars est dans le plan du méridien de Paris et de C', l'angle α est l'angle sous lequel on voit depuis Mars le segment Paris-point C'. C'est aussi l'écart entre les déclinaisons de Mars vu de Paris et du point C' (figure 5).

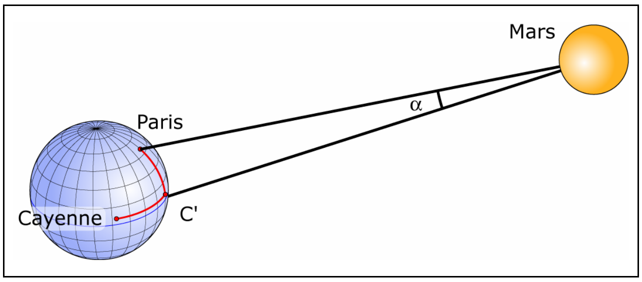
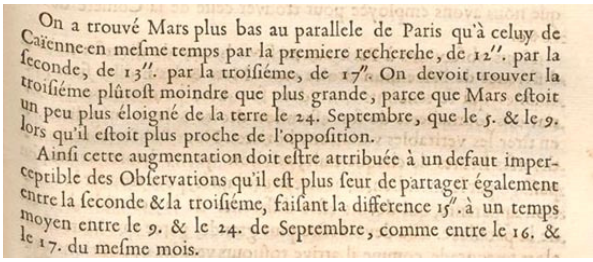


***Fig.5**. Les mesures de Cassini à Paris et de Richer à Cayenne ont permis de mesurer l'angle α.*

Cassini et Richer recommencent cette détermination de l'angle α le 9 septembre et le 23 septembre. Ils trouvent respectivement 13" et 17" alors que la distance de la Terre à Mars n'a pas sensiblement changé et vaut toujours 3/8 ua. Du 5 au 23 septembre, l'angle α n'a pas varié de façon mesurable mais chacune des hauteurs méridiennes étant mesurée à la seconde d'arc près, l'incertitude sur une mesure de α est de l'ordre de 4". L'ensemble des trois mesures permet de conclure que $\alpha = (14 \pm 3)"$


On a trouvé Mars plus bas au parallele de Paris qu'à celuy de Caïenne en mesme temps par la premiere recherche, de 12''. par la seconde, de 13''. par la troisiéme, de 17''. On devoit trouver la troisiéme plûtost moindre que plus grande, parce que Mars estoit un peu plus éloigné de la terre le 24. Septembre, que le 5. & le 9. lors qu'il estoit plus proche de l'opposition.

Ainsi cette augmentation doit estre attribuée à un defaut imperceptible des Observations qu'il est plus seur de partager également entre la seconde & la troisiéme, faisant la difference 15''. à un temps moyen entre le 9. & le 24. de Septembre, comme entre le 16. & le 17. du mesme mois.

Fig.6. *Cassini donne ses trois mesures de 12, 13 et 17" (source).*

En théorie, l'utilisation de l'étoile Ψ^1 Aquarii est inutile ; il suffirait de mesurer les hauteurs méridiennes de Mars à Paris et à Cayenne et de connaître l'écart en latitude de ces deux lieux mais les incertitudes sur les hauteurs méridiennes sont de plusieurs minutes à cause de la réfraction ; elles ne permettent pas de calculer par différence un angle de quelques secondes. Au contraire, les directions de Ψ^1 Aquarii et de Mars sont très voisines. Les erreurs sur les hauteurs méridiennes dues à la réfraction sont identiques et n'entachent pas leur différence.

La parallaxe de Mars est l'angle sous lequel on voit depuis Mars le rayon de la Terre. Lorsque Mars passe au méridien de Paris, il est aussi au méridien de C'.
Les droites Paris - Mars et C'- Mars sont pratiquement parallèles (angle de 14").
Soit z_P et $z_{C'}$ les distances zénithales de Mars à Paris et au point C' lors de son passage au méridien ; z_P et $z_{C'}$ sont complémentaires des hauteurs méri-diennes de Mars h_P et $h_{C'}$(figure 7).

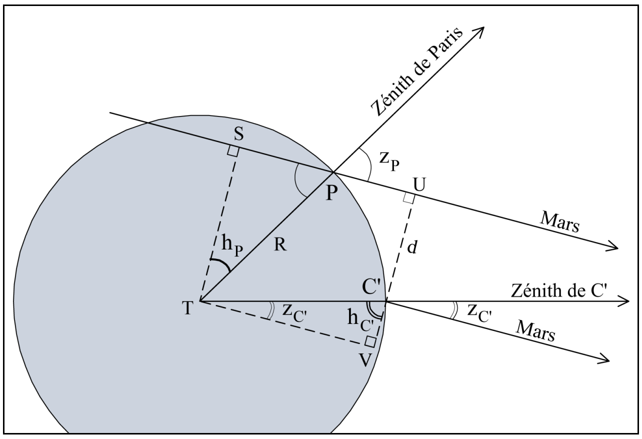


Fig.7. *Mars observé depuis P (Paris) et le point C'.*

D'après la figure 7, la distance d entre les droites Paris-Mars et C'-Mars en unité de rayon terrestre R est :
d = UV – C'V = ST – C'V = R (cos h_P - cos $h_{C'}$).
La distance d est vue depuis Mars sous l'angle $\alpha = 14"$.

La parallaxe de Mars est par définition l'angle p_M sous lequel on voit de Mars le rayon R de la Terre.

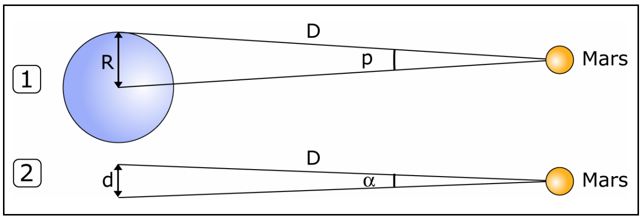


Fig.8. *Proportionnalité entre l'angle et la longueur visée, la distance D étant fixe. D est la distance de la Terre à Mars.*
1. La parallaxe de Mars p est l'angle sous lequel on voit le rayon de la Terre. On a donc R = D×p si l'angle est en radian.
2. La deuxième figure donne d = D×α avec α en radian.
On a donc D = R/p = d/α ou α/p = d/R

$$\frac{\alpha}{p_M} = \frac{d}{R} \text{ d'où } p_M = \alpha\frac{R}{d} = \frac{\alpha}{\cos\ h_P - \cos\ h_{C'}}$$

Dans ce calcul, les angles h_P et $h_{C'}$ n'ont pas besoin d'être connus à la minute près, la principale incertitude provenant de la valeur de α.

$$p_M = 14'' \times \frac{1}{\cos 31° - \cos 74°} = 24''$$

et l'incertitude $\Delta p_M = 3'' \times \frac{1}{\cos 31° - \cos 74°} = 5''$

La parallaxe de Mars en septembre 1672 était :
$p_M = (24 \pm 5)''$

Une fois connue la parallaxe de Mars, la formule R = D × p (figure 8) permet d'avoir sa distance D en fonction du rayon R de la Terre si p est en radians :
p = 24/3600 × π/180 et D = R×3600/24×180/π soit 8 600 R .

Cassini savait que Mars était à 3/8 ua, l'ua vaut donc : 8/3 × 8 600 R ou 23 000 R.

Mais Cassini préfère calculer auparavant la parallaxe du Soleil

La parallaxe du Soleil et sa distance à la Terre

La parallaxe du Soleil est l'angle p_S sous lequel on voit depuis le Soleil le rayon de la Terre (figure 9).

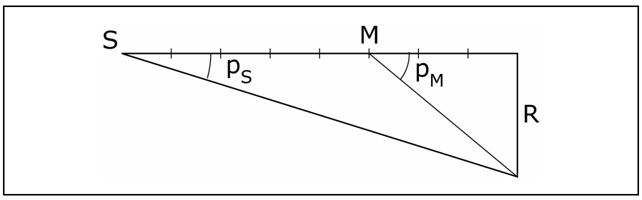


Fig.9. *Parallaxes de Mars et du Soleil.*

Les parallaxes étant de petits angles, elles sont proportionnelles à l'inverse de la distance.

En septembre 1672, Mars est à 3/8 ua de la Terre et sa parallaxe est p_M .
Le Soleil est à 1 ua de la Terre et sa parallaxe est

$$p_S = \frac{3}{8} p_M$$

La parallaxe du Soleil est donc $p_S = \frac{3}{8} \times 24'' = 9''$

et son incertitude $\Delta p_S = \frac{3}{8} \times 5'' = 2''$

La parallaxe du Soleil est $p_S = (9 \pm 2)''$

La distance moyenne **a** de la Terre au Soleil est directement liée à la parallaxe du Soleil par la relation : $\tan p_S = \frac{R}{a}$.

La distance de la Terre au Soleil est donc

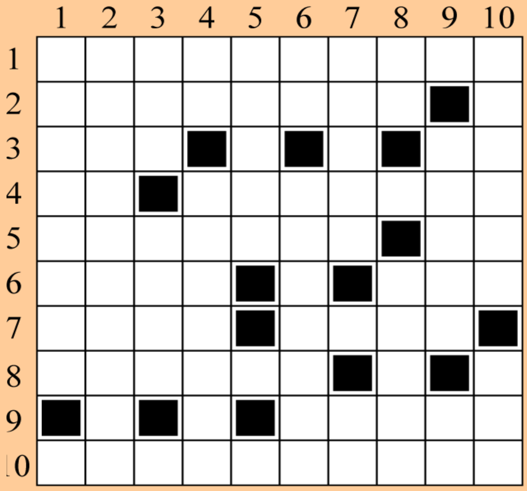
$$a = \frac{1}{\tan(9'')} R = 23\,000 \text{ rayons terrestres}$$

et l'incertitude sur a, $\Delta a = 5\,000$ rayons terrestres.
Cassini nous donne la valeur du rayon terrestre en lieues : R = 1 500 lieues. Mais quelle lieue ? Il y a à l'époque un grand nombre de définitions différentes selon les régions et son écrit ne précise pas laquelle il utilise.
Avec un rayon terrestre de 6 400 km, on obtient :

$$a = (150 \pm 30) \times 10^6 \text{ km}$$

Ce résultat constitue la première détermination de l'unité astronomique.
Mais Cassini n'avait pris que ses deux dernières déterminations de α en considération. Il utilise donc 15" (et non 14") comme valeur de α et trouve une distance Terre-Soleil de 140 millions de km. ■

Mots croisés "distances"



Horizontalement

1. Techniques de mesure de distance.
2. Quand Archimède tente de mesurer l'Univers.
3. Nombre de planètes pour Copernic. Unité de distance.
4. Système solaire abrégé. Étoile filante par exemple.
5. Sidéré, mais sur notre planète. Coupe en deux.
6. Type pas très spectral. Passage.
7. Il a permis d'améliorer la mesure de l'unité astronomique. Celui de la nuit a posé problème à Olbers.
8. Indiennes.
9. Il connaît la distance de toutes les planètes à n'importe quel moment.
10. Comme les calculs des astronomes avant l'invention de l'ordinateur.

Verticalement

1. Ceux de Vénus ont permis de mesurer l'unité astronomique.
2. Il fut le premier à trouver une méthode scientifique pour mesurer la distance du Soleil.
3. Cepheus, par exemple. Peut s'évaporer quand il est noir d'après Hawking.
4. Période de révolution. Mercure en a transporté plus d'un.
5. A permis une mesure précise de la distance de la Lune.
6. Mesure de distance céleste. À voir le 6 juin prochain pour mesurer la distance du Soleil.
7. Formation. Note.
8. Gaz rare. Fille du Soleil ou de la Lune.
9. Toujours à l'ouest. Demi-sel.
10. Sa distance est maintenant connue à quelques mètres près. Dieu n'y joue pas, d'après Einstein.

Solutions p. 40

AVEC NOS ÉLÈVES

Le système solaire à bout de bras

Philippe Merlin

Philippe Merlin nous propose ici une activité pour l'école primaire consistant à réaliser un système solaire à l'échelle. Mais au lieu de travailler à partir de distance, il propose d'utiliser (sans le dire) le diamètre apparent du Soleil depuis les différentes planètes.

À partir d'un petit objet rond ou sphérique, balle de tennis, petit ballon, cercle bien visible, il est construit un système solaire à l'échelle de cet objet pris comme Soleil.
Pour se placer à la bonne distance, on utilisera un *cache à encoches* (figure 1). Celui-ci doit être regardé à bout de bras (environ 50 cm pour un enfant de CE2).

***Fig.1.** Ce cache à encoche est calculé pour une distance œil main de 50 cm (réduit deux fois ici).*

Depuis Mercure, on doit voir le Soleil comme la première encoche vue à 50 cm. Plus on s'éloigne du Soleil, plus son diamètre apparent diminue, donc plus l'encoche est petite.

Les largeurs des encoches sont telles que regardées **à bout de bras**, elles sont vues sous le même angle que le Soleil vu de la planète (figure 2).
On aligne avec l'œil l'encoche de la planète choisie et l'objet Soleil. L'enfant doit se placer à une distance telle que l'encoche et l'objet soleil soit vus sous le même angle. L'objet soleil doit paraître aussi grand que l'encoche et se superposer.
Si l'encoche apparaît plus grande, il faut se rapprocher pour faire apparaître l'objet plus gros. Si elle paraît moins large, il faut se reculer pour diminuer le diamètre apparent de l'objet. La difficulté provient de la vision simultanée non nette des deux objets, l'un paraît un peu flou lorsque l'autre est net.
Pour une planète, une fois que l'enfant est bien placé, il pose un repère et mesure la distance à laquelle il se trouve de l'objet Soleil, en comptant le nombre de pas. Il notera ainsi toutes les distances en pas déterminées pour chacune des quatre premières planètes du système solaire. Pour les autres planètes, la distance à laquelle il faut se positionner est trop grande et l'angle de vision devient trop petit.
Après avoir fait un étalonnage de ses pas, il possible de convertir ses distances - pas en mètres. Il peut alors vérifier si ses distances sont plausibles (avec une bonne marge de souplesse bien sûr) avec le tableau page suivante.
Pour des enfants de tailles très différentes, il faut refaire des caches qui aient des largeurs des encoches adaptées à la longueur approximative de leurs bras (voir tableau II).

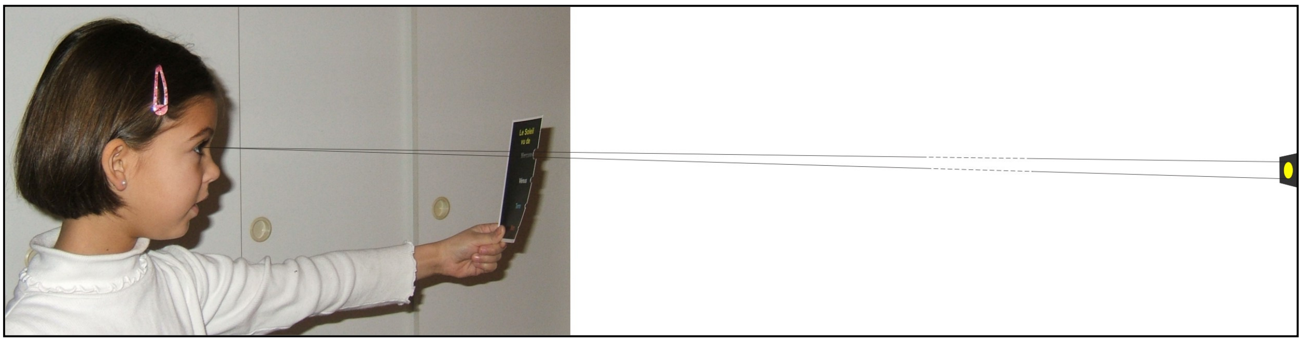


***Fig.2.** Utilisation du cache à encoche pour placer Mercure à la bonne distance du Soleil*

Variantes

Le rôle du Soleil peut être joué par un enfant, sa taille représentant le diamètre du Soleil. Mais il faut en choisir un plutôt petit, car les distances à l'échelle deviennent vite très grandes, plus de 100 mètres pour placer la Terre avec un enfant-soleil de 1,25 m.

Échelle et proportionnalité

La mesure avec des soleils de différentes tailles peut amener les enfants à l'idée de proportionnalité. En effet, prendre un objet Soleil deux fois plus grand (par exemple un petit ballon de 13 cm de diamètre après une balle de tennis) amène à avoir des distances deux fois plus grandes aussi.

Attention : ne jamais faire l'alignement du cache à encoches sur le vrai Soleil ! On risque de se brûler gravement la rétine.

L'activité peut être faite individuellement avec chacun un cache ou bien en petit groupe en laissant un élève à la place de chacune des planètes ou encore en plusieurs groupes sur différents objets soleil afin de comparer les distances, etc.

On peut donner aux élèves, pour noter leurs mesures, des cartons un peu rigides (cartons de tablettes de chocolat par exemple).

ANNEXES

Le système solaire avec une balle de tennis

La taille d'une balle de tennis est d'environ 6,4 cm

Planète	Distance à la balle	Diamètre de la planète
Mercure	2,7 m	0,2 mm
Vénus	5,0 m	0,6 mm
Terre	6,9 m	0,6 mm
Mars	10,5 m	0,3 mm
Jupiter	35,8 m	6,4 mm
Saturne	65,7 m	5.4 mm

Largeur des encoches

En fonction de la distance œil-encoche (en mm)

Distance œil-encoche (cm)	45	50	55	60
Mercure (mm)	10,8	12,0	13,2	14,4
Vénus (mm)	5,8	6,4	7,1	7,7
Terre (mm)	4,2	4,6	5,1	5,6
Mars (mm)	2,7	3,0	3,4	3,7

Caractéristiques des planètes

Planète	Symbole	demi grand axe de l'orbite (km)	demi grand axe de l'orbite (u.a.)	Période sidérale (jours)	Rayon équatorial (km)
Mercure	☿	57 909 082	0,387	87,969	2 439
Vénus	♀	108 208 600	0,723	224,701	6 052
Terre	♁	149 598 034	1,000	365,256	6 378
Mars	♂	227 939 184	1,524	686,980	3 397
Jupiter	♃	778 298 355	5,203	4 332,589	71 398
Saturne	♄	1 429 394 124	9,555	10 759,23	60 018
Uranus	♅	2 875 038 595	19,218	30 688,48	25 385
Neptune	♆	4 504 449 741	30,110	60 182,29	24 300

Unité astronomique (u.a.) : 1,495 978 70 10^{11} m   Rayon du Soleil $R_\odot$: 695 000 km

Vous trouverez une version de ce texte accompagné d'une page de commentaires pédagogiques et d'une feuille de 4 caches (pour la distance de 50 cm) en fichier PDF sur la page du site de formation continue des enseignants de l'Observatoire de Lyon :
http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/documents/sysbras/syssol_bout_bras.pdf
Remarques, commentaires, renseignements : Philippe Merlin Observatoire de Lyon - avenue Charles André 69561 Saint Genis Laval. ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Utilisation de la télémétrie laser pour la détermination de la distance Terre-Lune

Gilles Bouteville

Cet article est l'adaptation d'un TPE réalisé en 2004. Il montre comment on peut utiliser simplement les vraies mesures des tirs lasers entre la Terre et la Lune. Il pourra donner des idées d'activité à des enseignants ou des élèves. Ces données sont toujours disponibles en ligne.

La télémétrie laser a démarré dans les années 1960, aux États-Unis et en France. Avec la création du site du plateau de Calern (CERGA) dans les années 70, elle s'est continuellement développée avec pour cibles la Lune (à partir de 1969) et les premiers satellites géodésiques, dont Starlette lancé par le CNES en 1975 (toujours poursuivi). En 1998, la télémétrie laser mondiale constituée d'une quarantaine de stations s'est constituée en service : l'International Laser Ranging Service (ILRS).

Principe d'une mesure

La télémétrie Laser est une technique indirecte de mesure des distances séparant une station au sol et un réflecteur laser placé sur la Lune. Une station comprend un laser de forte puissance, qui envoie une impulsion vers le réflecteur, un télescope chargé de recueillir la lumière réfléchie et un système de datation donnant la date du tir et le temps aller-retour de la lumière.

Fig.1. *Tir laser sur la Lune depuis le plateau de Calern. (image observatoire de la Côte d'Azur).*

L'avantage de cette technique se situe dans la simplicité du concept de la mesure (mesure du temps de trajet d'une impulsion lumineuse) et dans son exactitude.

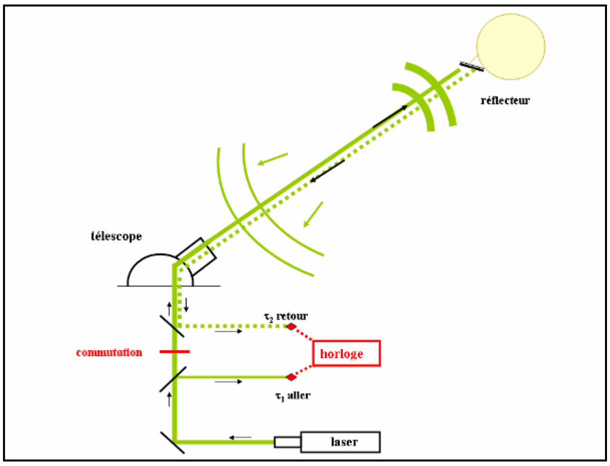
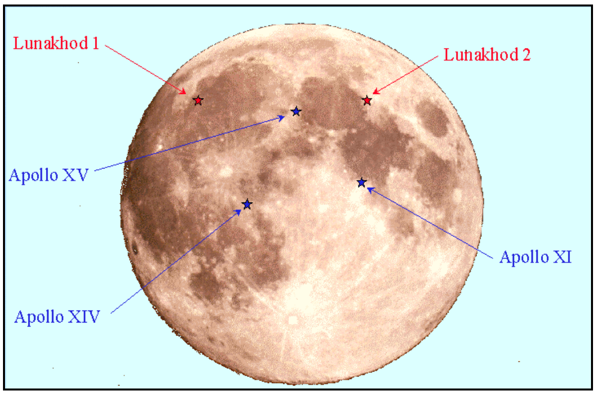


Schéma Culture Sciences Physiques (ENS Lyon) Voir sitographie

Fig.2. *Schéma de principe de la télémétrie laser.*

Elle utilise des rétro-réflecteurs, qui ont été déposés par les missions Apollo (USA) et Luna (URSS) entre 1969 et 1973.



Observatoire de la Côte d ' Azur

Fig.3. *Position des réflecteurs laser sur la Lune.*

Acquisition des mesures

Les données proviennent de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Elles sont toujours disponibles à l'adresse : www-g.oca.eu/gemini/donnees/las_lune/ptn.htm.

Une ligne représente un point normal. C'est-à-dire une mesure.

Un point normal est le temps du trajet aller-retour de la lumière à un instant t entre un point de référence de la station et un réflecteur, calculé à partir d'un certain nombre de mesures.

Exemple de ligne (ancien format international jusqu'en 1999)

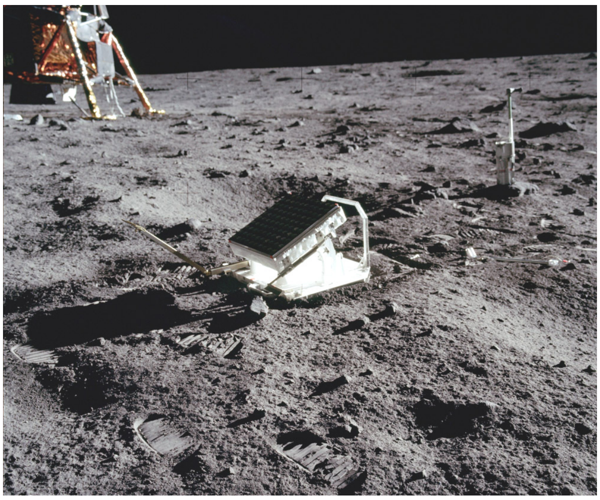
511998213223121731439026629923314973301910 80 1029 11 88610 11519 5320a 524

Explication du format (avec le nombre de caractères utilisés) :

5	Identification du format	1 car.
1	Couleur du laser 1 = vert, 2 = infrarouge	1 car.
19980213	Date (année mois jour)	8 car.
2231	Heures minutes	4 car.
217314390	Secondes (au moment du tir). L'unité est la centaine de nanoseconde	9 car.
26629923314973	**Mesure. L'unité est le dixième de picoseconde.**	**14 car.**
3	Réflecteur (0 = Apollo XI 2 = Apollo XIV 3 = Apollo XV 4 = Lunakhod 2	1 car.
01910	Site d'observation (ici l'OCA/CERGA)	5 car.
080	Nombre d'échos pour le point normal	3 car.
001029	Incertitude estimée (l'unité est le dixième de picoseconde)	6 car.
011	Signal/bruit estimé (unité = 0,1)	3 car.
1 caractère blanc		1 car.
088610	Pression atmosphérique (unité = 0.01 mbar)	6 car.
0115	Température atmosphérique (unité = 0,1 °C)	4 car.
19	Humidité en pourcentage	2 car.
05320	Longueur d'onde du laser (unité = 0,1 nm)	5 car.
a	Version du fichier	1 car.
0524	Durée de la série en secondes	4 car.

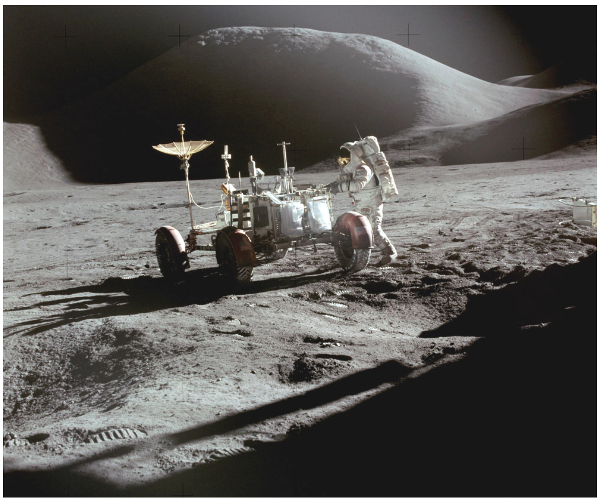
L'information essentielle est la durée du trajet aller retour des photons (ligne verte) :
2662992331497,3. 10^{-12} s soit 2,6629923314973 s

Après 1999 et jusqu'en 2005 (cessation de l'activité) le format change légèrement. 14 caractères à partir de la 19ᵉ position donnent la valeur de la mesure du temps (en vert dans l'exemple ci-dessous) :
512005073004101308**28802258797024**75847301910028003583021087359+175365320a053



Crédit NASA

Fig.4. Le réflecteur déposé par Apollo 11.



Crédit NASA

Fig.5. La mission Apollo 15 a aussi déposé un réflecteur.

Exemple d'étude à réaliser à partir de ces données.

Travail préliminaire

1. Déterminer une distance, connaissant la vitesse de la lumière : c = 299 792 458 $m.s^{-1}$.
2. Évaluer la précision sur la mesure du temps permettant de déterminer :
   a. Une distance exprimée avec différentes unités (km, m, …)
   b. Une distance compatible avec l'échelle choisie pour représenter l'orbite.

Tracé de l'orbite de la Lune

1. Choisir un ensemble de dates correspondant à une lunaison. Pour chacune déterminer le temps «de vol des photons ». On fera éventuellement une moyenne lorsque plusieurs mesures sont disponibles pour la même date.
2. Calculer les distances correspondantes.
3. Déterminer l'ordre de grandeur de l'apogée et du périgée. En déduire un choix d'échelle.
4. Évaluer la vitesse angulaire orbitale de la Lune, supposée constante (on fait ici une approximation assez importante puisque cette vitesse varie de plus de 10 %).
5. Relever les dates de la nouvelle Lune et de la pleine Lune par exemple sur : ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/moon/moonphas/
6. Choisir une origine (nouvelle Lune par exemple) et réaliser la graduation en jours correspondante.
7. Tracer les directions des rayons correspondant aux différentes dates. Reporter les longueurs associées.
8. Tracer l'orbite de la Lune.
9. Conclure sur la forme de l'orbite lunaire.

Pour aller plus loin

(activités complémentaires)

1. Relever dans les éphémérides les dates de passage à l'apogée et au périgée : http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/formulaire/form_ephephys.php
Comparer avec vos estimations.
Question possible : existe-t-il une relation entre pleine Lune, nouvelle Lune et apogée périgée ?
2. Comparer les résultats obtenus avec les estimations réalisées à partir des fiches CLEA – BELIN, ou de photographies prises au cours d'une lunaison.

Exemple de calcul

<u>Date 18/07/1990</u>

t = 2,406 044 851 435

distance = 2,406 044 851 435 × 299 792 458 / 2
= 360 657 050,034 9 m
= 3,606 570 500 349 . 10^8m
(/2 : il faut penser qu'il y a un aller et un retour)
soit 360 657 km
360 657 050 m
360 657 050 035 mm

On peut rechercher quelle incidence a la précision de la mesure du temps sur le résultat :

Avec une précision de la milliseconde
2,406 × 299 792 458 / 2 = 3,607 . 10^8 m
Erreur de 7 km sur la distance (erreur de 2.10^{-5})

Avec une précision de la microseconde
2,406 044 × 299 792 458 / 2 = 3,606 569 . 10^8 m
soit 360 657 km
Précision de l'ordre de l'hectomètre.

Avec une précision de la nanoseconde
2,406 044 851 × 299 792 458 / 2
= 3,606 570 50 . 10^8 m soit 360 657 050 m
Précision de l'ordre du mètre

La précision du millionième de seconde est nécessaire pour une détermination de la distance en kilomètres.

En changeant de date, on remarque les variations de la distance Terre - Lune :

<u>Date 10/07/1990</u>
2,579 243 127 355 x 299 792 458 / 2
= 3,866 188 184 115 . 10^8 m soit 386 619 km

<u>Sitographie</u>

Sur le site de l'observatoire de la Côte d'Azur, on trouve, en plus des mesures, de nombreux renseignements sur cette expérience.
wwwrc.obs-azur.fr/cerga/laser/laslune/llr.htm

Le site Culture Sciences Physiques (ENS de Lyon) propose un dossier consacré au laser lune avec de nombreux détails techniques que ce soit sur le laser ou sur la correction nécessaire à la traversée de l'atmosphère…
http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csphysique/metadata/LOM_CSP_laser-distance-terre-lune.xml

■

HISTOIRE

Petit historique des passages de Mercure et Vénus devant le Soleil

Jean-Noël Terry

Le dernier passage (ou transit) de Vénus devant le Soleil en 2004 avait donné lieu dans les Cahiers Clairaut à de très nombreux articles en particulier historiques. Jean-Noël Terry nous propose ici un résumé des nombreuses expéditions envoyées à travers le monde pour observer les passages de Vénus et de Mercure afin de calculer la distance du Soleil.

Les passages de Mercure

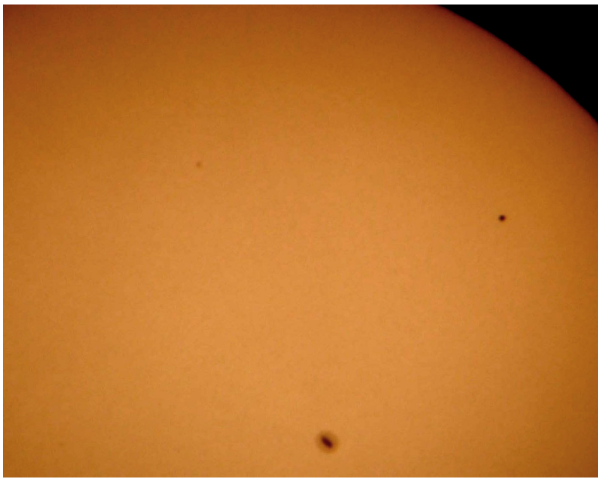


Fig.1. *Passage de Mercure devant le Soleil de mai 2003. Mercure est le point noir situé sur la droite. On peut voir en bas une tache solaire. Quand Mercure ou Vénus passe devant le Soleil, on parle d'un passage ou d'un transit de la planète.* (photo AC/SAB)

Au XII^{e} siècle, l'astronome andalou **Abu Ishaq al Bitruji al Ishbili**, nommé aussi Alpetragius, écrivit qu'il n'avait jamais vu passer Mercure devant le Soleil. Il en déduisit que la planète était transparente. En fait, nous savons aujourd'hui que le transit n'est pas observable à l'œil nu, vu la taille de Mercure. Il faudra attendre l'utilisation du télescope, donc jusqu'au transit de 1631. Celui-ci fut prédit par **Kepler** (1571-1630), en utilisant ses Tables Rodolphines (1627). La prévision était possible dans la mesure où on avait une bonne connaissance des mouvements orbitaux des planètes. Les transits précédents de 1615, 1618 et 1628 ne furent pas observés, non pas faute de télescope, mais par manque de prévision. Kepler prédit le transit de Mercure du 7 novembre 1631 et celui de Vénus du 7 décembre 1631. Mais il mourut un an avant. Il calcula une période de 120 ans entre deux transits de Vénus.

En 1631, **Pierre Gassendi** (1592-1655) observa le passage de Mercure : « Le rusé Mercure voulait passer sans être aperçu, il était entré plus tôt qu'on ne s'y attendait, mais il n'a pu s'échapper sans être découvert, je l'ai trouvé et je l'ai vu ; ce qui n'était jamais arrivé à personne avant moi, le 7 novembre 1631 le matin ».

Edmund Halley

En 1677, **Edmond Halley** (1656-1742) va orienter autrement les observations à venir. Le 7 novembre de cette année-là, il était à l'île de Ste-Hélène pour dresser un catalogue d'étoiles. Il nota, pour calculer la parallaxe du Soleil, l'entrée de Mercure dans le limbe, mais remarqua que la petite taille de Mercure empêchait d'atteindre une précision suffisante. Vénus était plus adaptée. Mais le transit de Vénus à venir était en 1761 : Halley aurait eu 108 ans. Il se limita à décrire la procédure à suivre dans un article publié dans les Philosophical transactions of the Royal Society en 1691, 1694 et 1716.

Halley espérait une parallaxe solaire à 1/500 près à condition d'observer les contacts à 2 secondes près. Mais il fallait se rendre sur des lieux d'observation éloignés, et déterminer avant, avec précision, leur latitude et leur longitude (longitude pour synchroniser les observations).

Il est intéressant de signaler ici que Halley souhaite « bonne chance » aux générations futures d'astronomes dans leurs observations !

Curieusement la méthode de Halley eut du mal à s'imposer. En particulier, **William Whiston** donna la liste des transits de Mercure et Vénus pour deux siècles, en estimant que Mercure était plus adaptée car on connaissait mieux son orbite. Il fut écouté par les astronomes français qui tentèrent des mesures en 1723 et 1753, pour conclure… qu'il avait tort !

La méthode de Halley

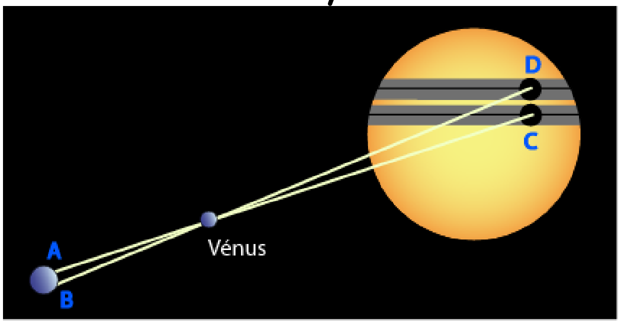


***Fig.2.** Passage de Vénus et distance du Soleil*

Si on observe un passage de la planète Vénus depuis deux points éloignés de la Terre A et B, on la verra décrire deux cordes différentes sur le disque solaire. Si on mesure la durée du passage vu depuis A et vu depuis B, on obtiendra donc deux résultats différents. La différence entre ces deux mesures de temps va permettre de calculer la distance angulaire entre C et D vus depuis la Terre, en minutes d'arc par exemple.

D'autre part, on connaît les distances des planètes au Soleil en fonction de la distance Terre-Soleil grâce aux observations et à la 3ème loi de Kepler. Sachant que la distance Vénus-Soleil vaut 0,72 fois la distance Terre-Soleil et connaissant la distance AB en km, on peut calculer la distance CD en km.
D'autre part, on connaît le plan du système solaire grâce à l'observation du mouvement des planètes ou à la 3^{e} loi de Kepler. On sait par exemple que la distance Vénus-Soleil vaut 0,72 fois la distance Terre-Soleil. La distance AB en km entre les deux observateurs est connue. le plan du système solaire permet de calculer CD en km.

Connaissant CD en km et en minutes d'arc, on en déduit la distance de la Terre au Soleil

La gloire de Vénus

Vénus est plus grosse et plus proche de nous, son transit peut être observé à l'œil nu.

Une première observation par **un astronome arabe** daterait de 639, à moins qu'il ne s'agisse d'une tache solaire.

Kepler avait annoncé un transit de Vénus pour le 6 décembre 1631 (de notre calendrier). **Gassendi** avait observé le transit de Mercure le mois précédent, il voulut faire de même et, prudent, observa du 5 décembre au 7 décembre, entre les nuages… en vain. Il ne savait pas que le transit avait eu lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre (Soleil sous l'horizon en France) !

Kepler n'avait pas prévu de transit avant 1761, ignorant qu'ils allaient par paires séparées de 8 ans.
Heureusement, **Jeremiah Horrocks** (1619-1641), mathématicien, né près de Liverpool en 1619, repéra la possibilité, en étudiant les calculs de Kepler, en octobre 1639, d'un transit le dimanche 4 décembre 1639 à 15 h.
Il observa le transit par projection avec une lunette galiléenne, comme Gassendi, obtenant une image de 15 cm de diamètre du Soleil. Il nota que Vénus était beaucoup plus noire que les taches solaires.
Il meurt le 2 janvier 1641, à 22 ans.

J. W. Lavender Astley Hall Museum and Art Gallery Chorley

***Fig.3.** Le passage de 1639 observé par Horrocks.*

En 1761

Joseph-Nicolas Delisle (1688-1768) envoya sa mappemonde du passage à plus de cent astronomes. L'Académie Royale des Sciences organisa trois campagnes. Il écrit : « Si nous laissons échapper cette occasion, cela ne saurait être ensuite compensé, ni par les efforts de génie, ni par la constance des travaux, ni par la magnificence des plus grands rois ; moment que le siècle passé nous enviait, et qui serait dans l'avenir, j'ose le dire, une injure à la mémoire de ceux qui l'auraient négligé. »
Le transit de 1761 fut observé par de très nombreux observateurs. Parmi eux Pingré, Chappe, Cassini, Maraldi, Lalande…
Mikhaïl Vassilievitch Lomonosov (1711-1765), depuis St-Petersbourg nota que le bord de Vénus apparaissait flou, et attribua ceci à l'existence d'une atmosphère, mais sa remarque passa inaperçue.
Les mesures de distance Terre-Soleil étaient moins précises que prévues par Halley : l'image de Vénus est en effet déformée, au moment où elle entre dans le disque et, quand elle redevient normale, le transit est commencé. Ce que les Anglo-saxons appellent le "Black Drop" (la goutte noire) amoindrit la précision de la mesure de la durée du passage (figure 4).

Fig.4. Le phénomène de la "goutte noire", lorsque Vénus arrive sur le disque solaire. Il est dû à la diffraction et rend plus difficile la détermination du début et de la fin du passage.

Les conditions des expéditions étaient aussi cause d'imprécision.

Quelques expéditions

- **Joseph-Nicolas Delisle** (né en 1688) organisa des expéditions pour les transits de 1761 et 1769 (mais mourut un an avant la deuxième).
- **Jean-Baptiste Chappe d'Auteroche** (1722-1769) fut choisi comme responsable d'une expédition à Tobolsk en Sibérie, suivant l'invitation de l'impératrice Élisabeth Ire.
- **Alexandre-Guy Pingré** (1711-1796) assisté de Denis Thuillier, prit le bateau, « Le Comte d'Argenson » de la Compagnie des Indes, le 9 janvier 1761, partant de l'Orient (Lorient aujourd'hui), pour l'île Rodrigue (au nord de Madagascar) ; ils arrivèrent sans encombre le 28 mai.

Et bien d'autres.

En tout état de cause, le bilan fut décevant, montrant une grande dispersion des résultats, la parallaxe du Soleil allant de 8,5" à 10,5".

La faute en était surtout à l'imprécision de la détermination des latitudes et des longitudes à l'époque.

En 1769

Pour multiplier les chances, des expéditions furent organisées dans les deux hémisphères, il y eut plus de 150 mesures faites en 80 lieux !

Les Anglais firent 69 observations, les Français 34 seulement. Au total il y en eut 151 sur 77 sites, avec 27 lunettes achromatiques (contre 3 en 1761).

En 1874

En 1824, **Johann Encke** fit une analyse rigoureuse des résultats de 1769, trouvant une parallaxe moyenne de 8,604". La distance obtenue était trop élevée, 153 millions de km, on le savait par l'utilisation d'autres méthodes, donc on persiste !

En 1871, le Congrès des États-Unis vote des crédits pour 8 expéditions : 5 au Sud (îles Kerguelen, Tasmanie, Nouvelle Zélande, île de Chatham, le Pacifique) et 3 au Nord (Nagasaki au Japon, Vladivostok en Sibérie et Pékin).

La photo étant née, chaque équipe fut équipée d'un télescope de 5 pouces avec plaque photo.

Mais la météo ne fut pas favorable. Il y eut des mesures en Nouvelle-Zélande, à Pékin où James Watson découvrit aussi un astéroïde le 10 octobre (n° 139), baptisé Juewa par le roi de Chine.

À Vladivostok, le temps fut instable et les photos de mauvaise qualité. Les photos utilisables furent celles de Nagasaki et Kerguelen.

Des expéditions furent aussi montées par la France et l'Angleterre. Les résultats ne furent guère plus probants : Airy calcula 8,754" ; Edward Stone 8,88" et Tupman 8,81".

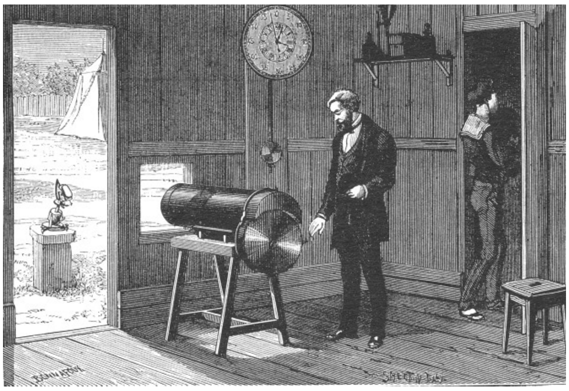


Fig.5. Le revolver photographique de Janssen, installé derrière un télescope, pour observer le passage de Vénus de 1874 depuis le Japon. Le but est d'enregistrer une série d'image sur une même plaque pour déterminer avec un maximum de précision l'instant du début du passage.

En 1882

Le transit du 6 décembre 1882 était le dernier avant le XXIe siècle, et visible plus facilement. Mais une certaine désillusion se faisait jour.

Aux États-Unis, ce fut tout de même un succès populaire avec un télescope dans la rue Broad Street, non loin de la Bourse, et des gens observant à travers des verres fumés. Quelques écoles furent même fermées pour la journée et le phénomène fit la une des journaux.

Des observatoires furent installés en Argentine et en Afrique du Sud (Natal).

Les Français organisèrent 10 missions.

Ce transit n'apporta pas de progrès sensible dans la précision de la parallaxe : 8,79" (Newcomb). On ne pouvait faire mieux avec cette méthode.

En 2004

Le plus récent transit, visible depuis l'Europe, a suscité de nombreuses observations et animations.

La totalité du passage était visible en France métropolitaine. Il faudra attendre 2247 pour retrouver une telle occasion !

En 2012, seule la fin pourra être observée juste après le lever du Soleil.

Tentez votre chance à votre tour ! ■

Passage de Vénus devant le Soleil le 6 juin 2012

Pierre Causeret

Il serait dommage de ne pas observer le dernier passage de Vénus devant le Soleil du 21e siècle mais il faudra se lever tôt. Il serait aussi dommage de ne pas tenter à nouveau une mesure de la distance du Soleil comme nous l'avions fait la dernière fois. Voici donc quelques conseils pour essayer de profiter pleinement de cet événement exceptionnel.

Le 8 juin 2004, Vénus passait devant le Soleil. Cela n'était pas arrivé depuis 122 ans. À cette occasion, les Cahiers Clairaut avaient publié toute une série d'articles sur le phénomène, articles toujours disponibles en ligne sur notre site (www.clea-astro.eu).

Le passage du 6 juin prochain sera beaucoup moins facile à observer puisqu'il se produit entre 0 h 10 et 6 h 50 (heure française). Vous trouverez à la fin de cet article une feuille à photocopier pour sensibiliser vos élèves, votre entourage… à ce phénomène. La carte de l'IMCCE ci-dessous montre les meilleurs lieux d'observation. Depuis le Japon par exemple, l'ensemble du phénomène sera visible. Mais en France métropolitaine comme à l'île de la Réunion, nous ne verrons que la fin du passage au lever du Soleil.

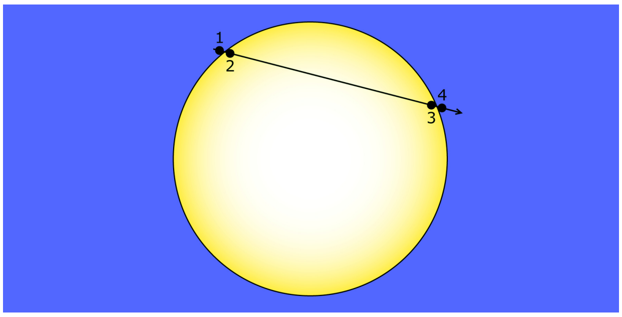
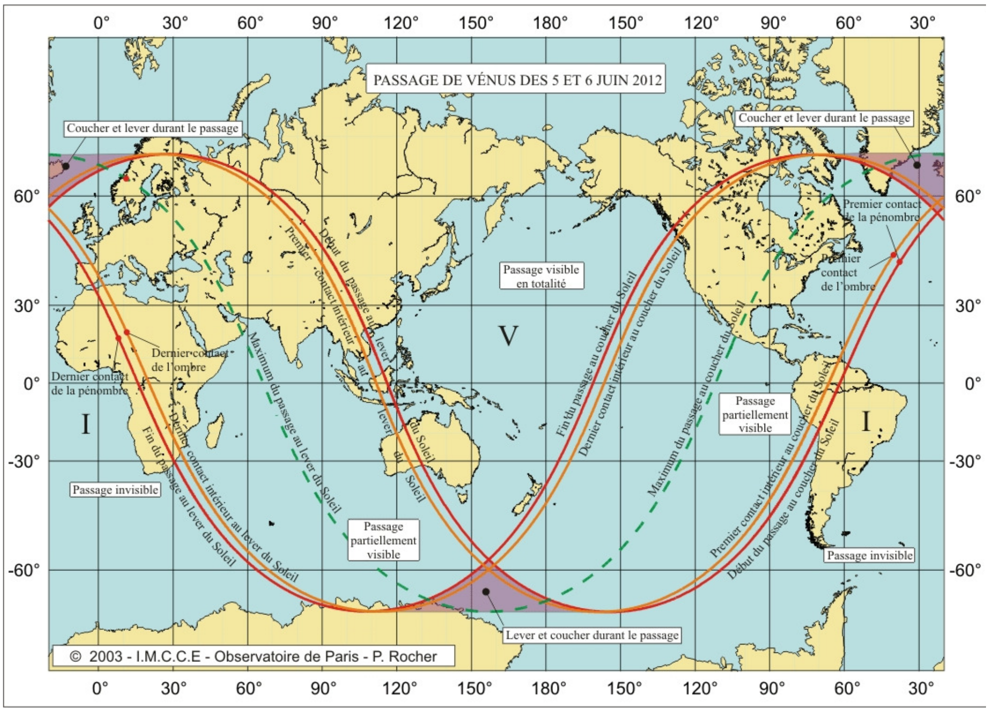


Fig.1. *Le passage de Vénus du 6 juin 2012 en heure légale et vu depuis le centre la Terre (source IMCCE).*
1. 1er contact : 0 h 10   3. 3e contact : 6 h 32
2. 2e contact : 0 h 27   4. 4e contact : 6 h 50
Ajouter environ 5 min en France pour les phases 3 et 4.



On pourra donc observer le phénomène depuis le lever du Soleil jusqu'à 6 h 56. Pour connaître avec précision l'heure de ce lever (entre 5 h 30 au nord-est et 6 h 30 au sud-ouest en France), on pourra utiliser un logiciel d'astronomie ou aller sur le site de l'IMCCE (éphémérides puis lever et coucher). Vous trouverez aussi l'azimut du lever (au nord-est, entre 50° et 60° à partir du nord) pour prévoir le premier plan de vos photos.

Fig.2. *Carte du passage de Vénus du 6 juin 2012 (carte Patrick Rocher / IMCCE).*

L’observation

Il est très difficile de prévoir la luminosité du Soleil à son lever. Il peut être observable à l'œil nu (mais jamais trop longtemps) mais aussi être éblouissant. Il est donc difficile de savoir quel type de filtre utiliser. Il est possible que les filtres habituels (comme les lunettes spéciales éclipses) soient trop denses. L'idéal serait d'avoir des filtres de différentes densités, plusieurs verres de soudeur par exemple, jusqu'au n° 14. Le plus sûr sera d'observer par projection derrière une paire de jumelles (fig. 4), une lunette, ou encore avec un Solarscope (fig. 5).

Fig.3. *Observation du Soleil par projection derrière une paire de jumelles fixée sur un pied photo. Ce type d'installation est à surveiller constamment pour éviter qu'une personne regarde à travers les jumelles et se brûle les yeux.*

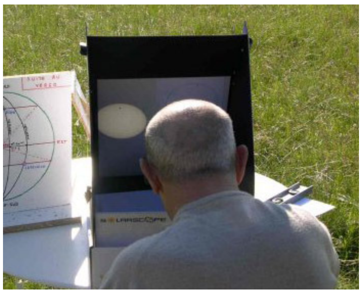


Fig.4. *Observation du passage de Vénus du 8 juin 2004 à l'aide d'un Solarscope. On peut deviner la tache noire de Vénus sur la photo, en haut du disque lumineux du Soleil*

La photographie

Pour espérer photographier la tache noire de Vénus sur le disque solaire, il faut soit un zoom, soit utiliser un instrument astronomique. Si le Soleil est suffisamment assombri par l'atmosphère, on pourra tenter des photos sans filtre (figure 6).

Fig.5. *L'éclipse du 31 mai 2003 photographiée au lever du Soleil sans filtre.*

Si le Soleil est trop lumineux, il faudra soit diaphragmer l'instrument, soit utiliser un filtre. On trouve des filtres en mylar pour l'observation du Soleil dans les magasins d'astronomie. Mais là encore, l'idéal serait de disposer de filtres de *différentes densités.*

Fig.6. *Trois techniques de photo pour le passage du 6 juin :*
1. *Téléobjectif.*
2. *Lunette avec appareil compact derrière oculaire.*
3. *Lunette sans oculaire avec boîtier reflex sans objectif.*
Il faudra ajouter un filtre si le Soleil est trop lumineux.

La mesure de l’unité astronomique

À l’occasion du dernier passage de Vénus, le CLEA avait réussi à calculer la distance du Soleil en superposant deux photos prises au même instant, l’une depuis l’île de la Réunion, l’autre depuis Dijon et en mesurant le décalage entre les deux positions de Vénus. La fiche pédagogique est disponible sur notre site.

Fig.7. *Les deux photos du 8 juin 2004 qui nous ont permis de calculer la distance du Soleil (photos A. Peyron/P. Causeret).*

Nous proposons aux volontaires d’essayer de refaire l’expérience. Mais ce sera beaucoup plus délicat car, le Soleil sera bas sur l’horizon et la réfraction atmosphérique déformera les images.

Résumé du protocole :

1. Faire une photo du Soleil à 4 h 30 TU (6 h 30 heure française).
2. Sans bouger la monture (donc sans motorisation) refaire une photo 2 minutes plus tard pour avoir l’orientation précise de l’image.

Si vous êtes intéressé, contactez-moi pour avoir davantage de détails (*pierre.causeret@wanadoo.fr*).

Document à photocopier

6 juin 2012, passage de Vénus devant le Soleil

un phénomène exceptionnel pour les lève-tôt

Le mercredi 6 juin 2012, très tôt le matin, la planète Vénus passera devant le Soleil, visible comme une petite tache noire sur le disque solaire. C'est un événement exceptionnel puisqu'il ne se reproduira pas avant le 11 décembre 2117 ! Mais attention, il est dangereux d'observer le Soleil sans protection.

Le phénomène

Tous les 19 mois environ, la planète Vénus passe entre la Terre et le Soleil. Mais la plupart du temps, il n'y a rien à voir car elle passe trop haut ou trop bas, son orbite étant inclinée par rapport à l'orbite terrestre (figure 1). De manière exceptionnelle, il arrive qu'elle passe juste devant le Soleil (figure 2).

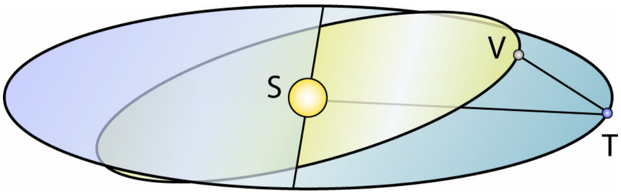


Fig.1. *On voit ici, depuis la Terre, Vénus passer au-dessus du Soleil.*

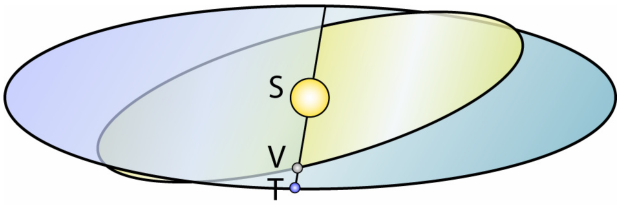


Fig.2. *Dans cette configuration, on observe un passage de Vénus devant le Soleil.*

Le 6 juin 2012, le passage débute à 0 h 10. Nous ne pourrons pas le voir en France, le Soleil étant couché, mais il sera observable depuis l'est de l'Asie ou depuis l'Australie. Il se termine à 6 h 50, peu de temps après le lever du Soleil en France.

Quand observer ?

Il faudra se lever tôt, en même temps que le Soleil et observer au nord-est. Voici les heures de lever du Soleil pour quelques villes de France ce jour-là.

Strasbourg	5 h 30	Poitiers	6 h 08
Lille	5 h 39	Rennes	6 h 10
Dijon	5 h 46	Toulouse	6 h 15
Paris	5 h 50	Bordeaux	6 h 19
Lyon	5 h 53	Brest	6 h 20
Marseille	6 h 00	Bayonne	6 h 27

Heure du lever du Soleil le 6 juin (heure légale). Le passage est totalement terminé à 6 h 50. Ce sont donc les habitants du Nord-Est de la France qui seront les plus avantagés.

Comment observer ?

Il ne faut jamais observer le Soleil directement, on risque de se brûler gravement la rétine. Il faut donc utiliser des filtres prévus à cet effet comme les lunettes spéciales éclipses. Au lever du Soleil, celui-ci est moins lumineux, un verre de soudeur peut suffire. Une solution simple et sans danger consiste à observer par projection sur une feuille avec une lunette ou des jumelles à condition de ne surtout pas mettre l'œil à l'oculaire (figure 3).

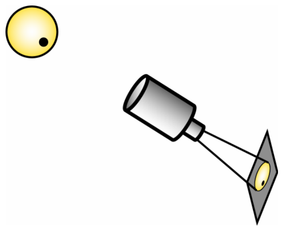


Fig.3. *Observation par projection à partir d'une petite lunette. L'image du Soleil est projetée sur une feuille blanche. Il ne faut surtout pas regarder directement dans l'instrument.*

Exceptionnellement, si l'atmosphère est brumeuse, il arrive qu'on puisse regarder le lever du Soleil sans filtre mais pas plus de quelques secondes.

Comment photographier ?

Au lever du Soleil, on pourra tenter de le photographier sans filtre. Mais il faudra absolument zoomer pour que la tache de Vénus soit visible. L'idéal est d'utiliser un télescope ou une lunette astronomique.

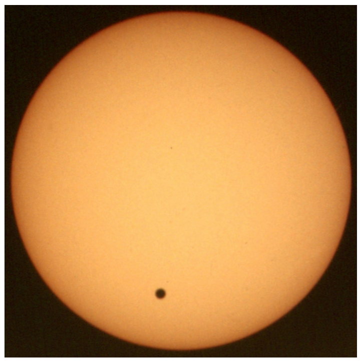
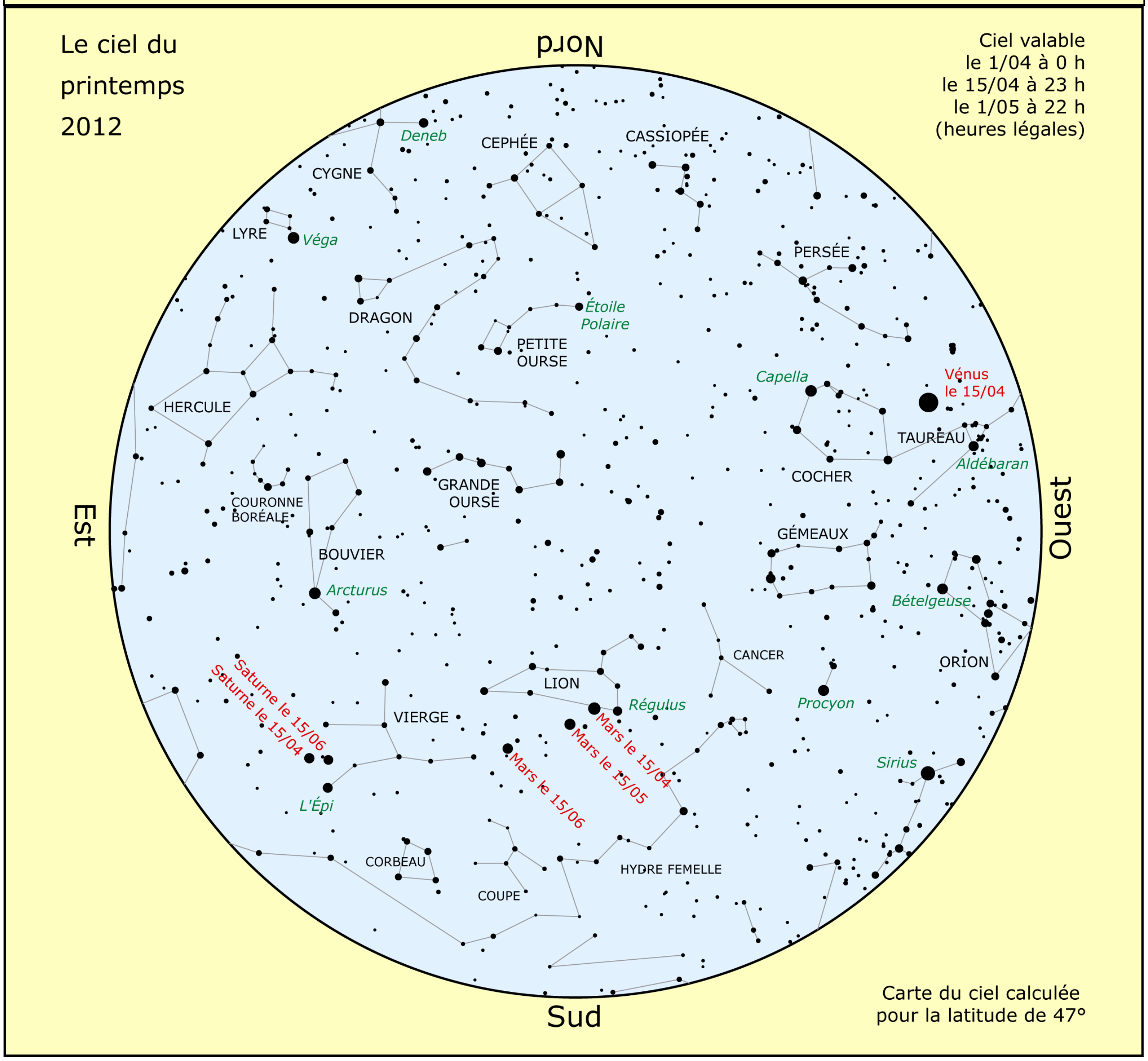


Fig.4. *Vénus photographiée devant le Soleil lors de son dernier passage, le 8 juin 2004.*

L'intérêt scientifique

De nombreuses expéditions ont été organisées au 18^{e} et au 19^{e} siècle pour observer les passages de Vénus depuis deux points éloignés de la Terre. Ces observations ont permis aux astronomes de calculer la distance du Soleil, 150 millions de km. ■

Le ciel du printemps 2012



Visibilité des planètes

Vénus est à suivre de près pendant tout le printemps. Elle est actuellement très brillante le soir, visible en quartier dans un instrument fin mars puis en croissant de plus en plus fin mais d'un diamètre apparent de plus en gros jusqu'à fin mai. Elle passe devant le Soleil le 6 juin (voir pages 30) et on la retrouve en croissant du matin dans la deuxième quinzaine de juin. On pourra la photographier à proximité de la lune les 26/03 et 24-25/04.

Jupiter reste encore visible pour un mois environ, jusqu'en avril.

La planète **Mars** est passé à l'opposition le 3 mars, elle est donc bien visible le soir dès la tombée du jour.

Saturne est à l'opposé du Soleil mi avril. C'est donc une très bonne période pour l'observer, d'autant plus que ces anneaux sont bien ouverts cette année (maximum 2017).

Quelques événements

20/03 : équinoxe de printemps à 5 h 14 TU.
23/03 : la Lune en très mince croissant se couche presque en barque.
25/03 : passage à l'heure d'été (UTC + 2 heures).
27/03 : élongation maximale de Vénus (46°).
03/04 : Vénus dans les Pléiades.
14/04 : Mars stationnaire.
15/04 : opposition de Saturne.
06/05 : plus grosse pleine Lune de l'année.
20/05 : éclipse annulaire de Soleil (en Asie).
06/06 : Passage de Vénus devant le Soleil
21/06 : solstice d'été à 1 h 09 heure légale (le 20 en TU).

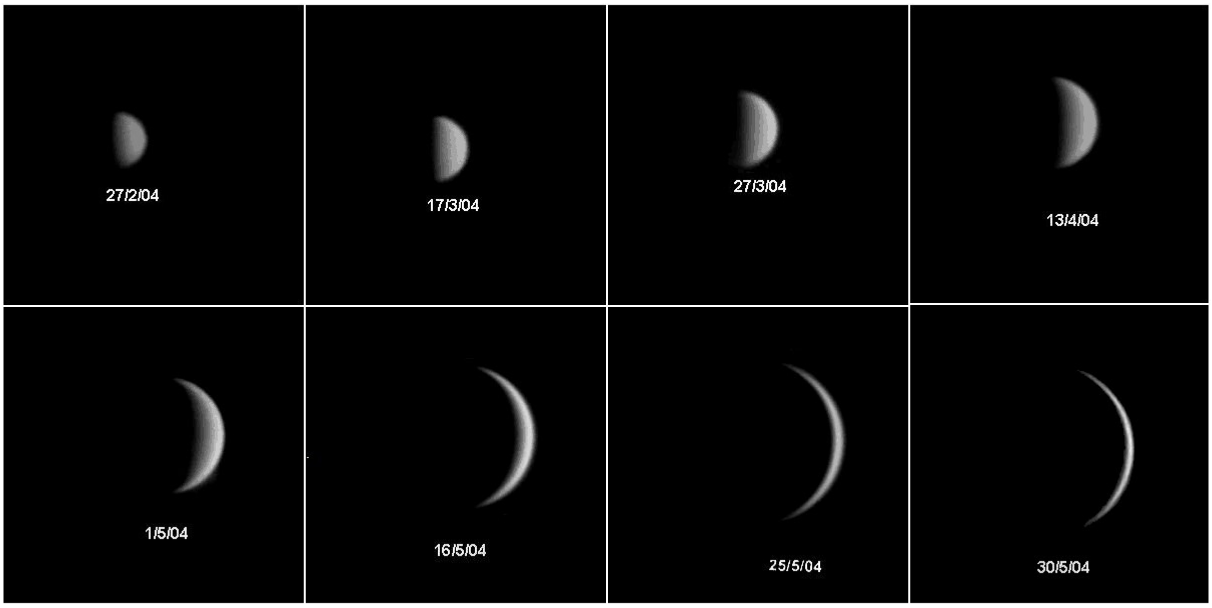
Lune

Nouvelle Lune : 22/03, 21/04, 21/05, 19/06.
Pleine Lune : 6/04, 6/05, 4/06.

AVEC NOS ÉLÈVES

Une drôle de façon de mesurer le rayon de l'orbite de Vénus

Francis Berthomieu



Quelques photos de Vénus, de février à mai 2004

Exploitation d'une des photos : à l'aide d'un logiciel de traitement d'images, ou au compas sur un tirage papier, on trace avec soin autour du limbe un cercle de diamètre D. On place ensuite le point P sur le bord du terminateur.

On mesure le diamètre D du cercle qui entoure la planète ; exemple du 1/5/2004 : D = 112 pixels

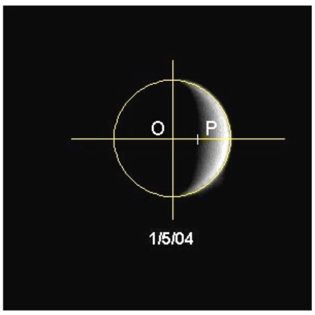
On mesure OP et OA (en pixels sur l'image numérique ou en mm sur un tirage papier).

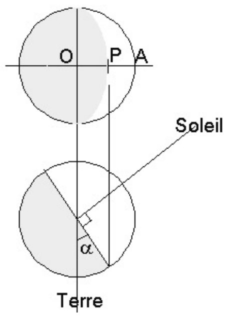
OP = 21 pixels OA = 56 pixels

La relation OP/OA = sin α permet le calcul de l'angle α.

OP/OA = 0,37 d'où $\alpha = 25°$

On en déduit l'angle Soleil-Vénus-Terre : ici, SVT = $90° + \alpha$. On trouve SVT = 115°





On procède de la même façon pour les 8 photographies.

Le tableau suivant rassemble les résultats :

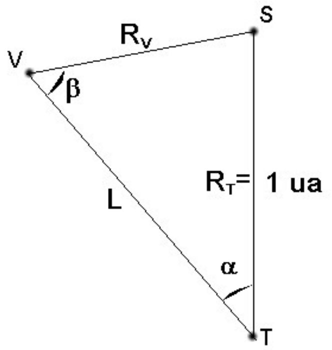
Date	N° du jour	Diamètre d (pixels)	Angle SVT (°)
27/02/04	0	52	72
17/03/04	19	64	81
27/03/04	29	72	88
13/04/04	46	88	98
01/05/04	64	110	115
16/05/04	79	148	136
25/05/04	88	162	148
30/05/04	93	172	155

Exploitation.

Sur le schéma qui suit, S, V et T sont respectivement le Soleil, Vénus et la Terre à un instant donné.

R_V et R_T sont respectivement les rayons des orbites (supposées circulaires) de Vénus et de la Terre.

La distance L entre la Terre et Vénus et le diamètre apparent de Vénus vue depuis la Terre sont inversement proportionnels. A une date donnée, la distance L est donc aussi inversement proportionnelle au diamètre d de Vénus mesuré sur la photo correspondante : L = k / d



Enfin, on sait que dans le triangle SVT, on a : $R_T^2 = R_V^2 + L^2 - 2.R_V.\ L\ .\cos\beta$

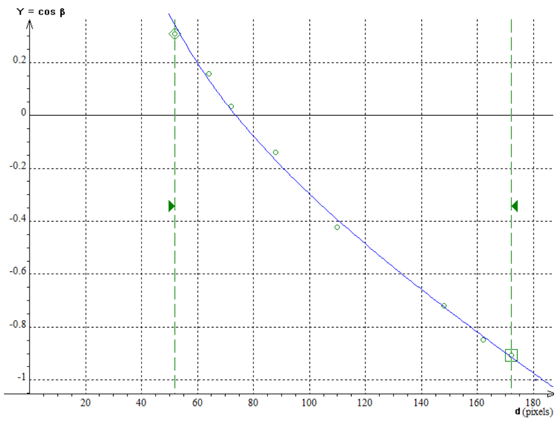
Avec R_T = 1 ua, et L = k/d, cela donne : $R_V^2 + (k/d)^2 - 2\ .\ R_V.\ (k/d)\ .\cos\beta = 1$

et enfin : $\cos\beta = [R_V^2 + (k/d)^2 - 1] / [2\ .\ R_V.\ (k/d)]$

On pose Y = cos β et l'on se propose de modéliser la fonction Y = f(d).

En introduisant les valeurs obtenues pour d et β dans le tableur REGRESSI, il est immédiat de lui faire calculer Y = cos β. Le même logiciel permet de tracer le graphe donnant Y en fonction de d.

Il permet enfin et surtout de rechercher automatiquement les valeurs optimales de R_V et k pour que la courbe théorique passe au plus près des points expérimentaux. Voici le graphe obtenu.



Les valeurs de R_V et k proposées par REGRESSI sont $\mathbf{R_V = 0{,}72}$ **ua**

(et k = 51 … sans intérêt particulier pour nous).

Nous avons ainsi obtenu une valeur (satisfaisante) du rayon de l'orbite de Vénus.

On peut alors poursuivre les recherches :

Dans le triangle SVT, $\sin\alpha / R_V = \sin\beta / 1$ donc

$\sin\alpha = R_V\ .\ \sin\beta$

On en déduit donc la valeur de l'angle α :

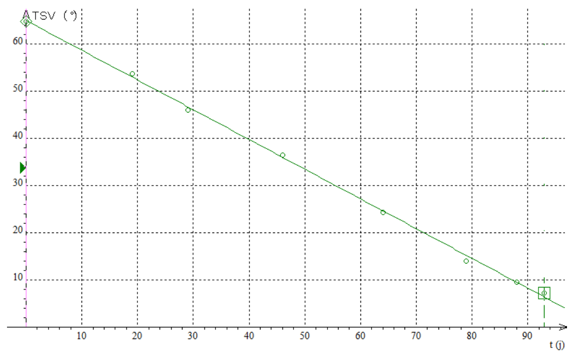
$\alpha = \arcsin(R_V\ .\ \sin\beta)$

Et par conséquent l'angle TSV : TSV = 18-β – α

Voici les résultats trouvés dans REGRESSI

N° du jour	TSV
0	64,8
19	53,7
29	46 ,0
46	36,5
64	24,3
79	14,0
88	9,6
93	7,3

En traçant le graphique qui donne l'angle TSV en fonction du temps on peut le modéliser par une droite, modélisable sous la forme : TSV = n . t + b



REGRESSI trouve n = - 0,63 °/jour : C'est la diminution quotidienne de l'angle TSV.

La Terre tourne autour du Soleil en parcourant environ 1° par jour (en supposant son mouvement uniforme, on trouve 360/365 = 0,98 °/jour).

On en déduit que Vénus tourne de 0,98 + 0,63 = 1,61° par jour autour du Soleil : cela correspond à une période sidérale de 360 / 1,61 = **224 jours.**

La valeur admise est 224,7 jours… ■

COMPLÉMENT

Suite à l'article "L'effet Doppler et les lois de Kepler" de Cécile Ferrari dans le précédent numéro des Cahiers Clairaut, Pierre Causeret propose ci-dessous un exercice qu,i partant des données d'observation, permet de déterminer la masse d'une exoplanète.

Nous devons également corriger une erreur, dans le chapeau de l'article de Cécile Ferrari, j'avais écrit que personne n'a jamais vu une exoplanète dans un télescope ; et oui je suis de la vieille école avec l'œil à l'oculaire; J'avais oublié que l'on pouvait les photographier. La première fut Fomalhaut b dont l'existence fut soupçonnée en 2005 et qui fut détectée sur des photographies prises par Hubble en 2004 et 2008. En 2010 trois exoplanètes furent photographiée depuis le Mont Palomar autour de l'étoile HR 8799.

Jean Ripert

Calcul de la masse de 51 Pegasi b

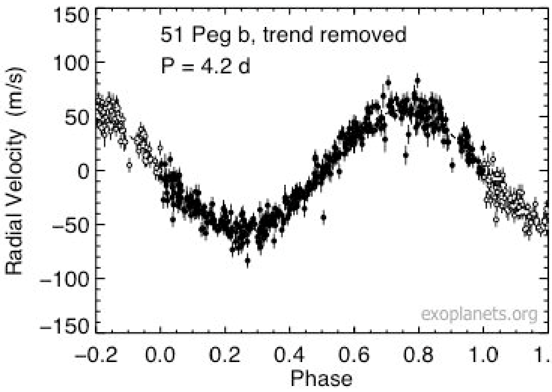
51 Pegasi b est le nom de la première exoplanète découverte par Michel Mayor et Didier Queloz à l'observatoire de Haute-Provence grâce au spectromètre ELODIE. La méthode a été décrite dans le dernier numéro des Cahiers Clairaut. Voici une application concrète, le calcul de la masse de cette planète.

51 Pegasi (51 Peg en abrégé) est le nom de l'étoile. La planète qui orbite autour a été nommée 51 Peg b et surnommée Bellérophon, du nom du héros grec qui a dompté le cheval Pégase.

Ce que l'on savait de 51 Peg

51 Peg est une étoile semblable au Soleil, de type spectral, G3 V. De plus, on connaît sa distance par mesure de parallaxe (48 années-lumière), sa magnitude visuelle par l'observation (5,5), donc sa magnitude absolue (4,5). À partir de ces données, on trouve que sa masse est très légèrement supérieure à celle du Soleil (1,06 masse solaire soit $2{,}11\times10^{30}$ kg).

Ce que nous a appris ELODIE



(image exoplanets.org sur en.wikipedia.org)

Le graphique ci-dessus représente les valeurs de la vitesse radiale qui proviennent des mesures du spectromètre[14]. La vitesse radiale maximale est un peu supérieure à 50 m/s et la période (notée P = 4.2 d sur ce graphique) est de 4,2 jours. Pour les calculs ci-dessous, on a retenu une vitesse radiale maximale de 56 m/s.

Notations

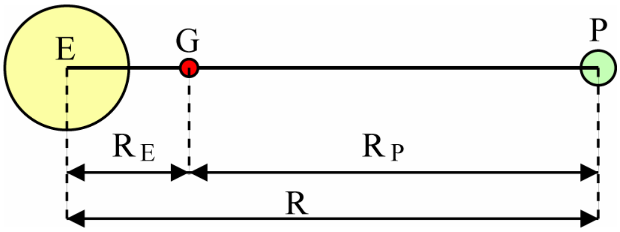
On note :

R_E, la distance du centre de l'étoile au centre de masse du système étoile planète (inconnue).

M_P, la masse de la planète (inconnue) et M_E la masse de l'étoile (connue) : $M_E = 2{,}11\times10^{30}$ kg.

R_P, la distance du centre de la planète au centre de masse du système étoile planète (inconnue).

R, la distance du centre de l'étoile au centre de la planète (inconnue).



V_E, la vitesse linéaire (supposée constante) de l'étoile sur son orbite (supposée circulaire) autour du centre de masse. Si on suppose que la Terre est dans le plan de l'orbite, la vitesse radiale maximale mesurée par effet Doppler est égale à V_E. On prendra V_E = 56 m/s. Si la Terre n'est pas dans le plan de l'orbite, V_E est supérieur à la vitesse radiale mesurée.

F, la force d'attraction entre l'étoile et la planète.

T_E, la période de révolution de l'étoile autour du centre de masse. T_E = 4,2 jours. **On a la même période de révolution pour la planète** T_P = 4,2 jours.

Les formules

(1) $M_E R_E = M_P R_P$ (définition du centre de masse).

(2) $R = R_E + R_P$ (voir figure).

(3) $F = G\,\dfrac{M_E M_P}{R^2}$ (loi de Newton).

(4a) $F = M_E\,\dfrac{V_E^2}{R_E}$ et (4b) $F = M_P\,\dfrac{V_P^2}{R_P}$ (force centripète).

(5a) $T_E V_E = 2\,\pi\,R_E$ et (5b) $T_P V_P = 2\,\pi\,R_P$ (distance parcourue en une révolution).

<u>Calcul de R_P à partir de M_E et T_P</u>

Les formules (3) et (4b) donnent $V_P^2 = G\,\dfrac{M_E R_P}{R^2}$.

La formule (5b) donne $V_P^2 = \dfrac{4\,\pi^2 R_P^2}{T_P^2}$

d'où $G\,\dfrac{M_E R_P}{R^2} = \dfrac{4\,\pi^2 R_P^2}{T_P^2}$ ou $\dfrac{T_P^2}{R_P\times R^2} = \dfrac{4\,\pi^2}{G\,M_E}$.

Or, $R_P\times R^2 = R_P\times(R_P + R_E)^2 = R_P^3\times(1 + R_E/R_P)^2 = R_P^3\times(1 + M_P/M_E)^2$ qu'on assimile à R_P^3 car $M_P \ll M_E$.

[14] Le graphique montre en réalité les variations de la vitesse radiale. En effet, l'étoile 51 Pegase s'approche de nous à la vitesse de 33,7 km/s, vitesse qui a été soustraite des mesures.

On retrouve donc la 3e loi de Kepler $\frac{T_P^2}{R_P^3} = \frac{4\,\pi^2}{G\,M_E}$.

Avec :
$G = 6{,}67\times10^{-11}$ N.kg^{-2}.m^2, $M_E = 2{,}11\times10^{30}$ kg,
$T_E = 4{,}2\times24\times3600$ s, on trouve :
$R_P = 7{,}8\times10^9$ m soit environ 7,8 millions de km.

<u>Calcul de M_P</u>

La formule (5a) $T_E\ V_E = 2\ \pi\ R_E$ donne R_E.
$T_E = 4{,}2\times24\times3600$ s et $V_E = 56$ m.s^{-1}
d'où R_E = **$3{,}2\times10^6$ m**

On peut alors calculer M_P avec la formule (1) :
$M_E\ R_E = M_P\ R_P$.
$M_E = 2{,}11\times10^{30}$ kg , **$R_E = 3{,}2\times10^6$ m]**,
$R_P = 7{,}8\times10^9$ m donc $M_P = 8{,}7\times10^{26}$ kg.
On convertit souvent en nombre de masse de Jupiter (de masse $1{,}908\times10^{27}$ kg).

On trouve donc pour la masse de 51 Peg b 0,46 fois la masse de Jupiter.
Comme on n'a pas tenu compte d'une éventuelle inclinaison de l'orbite, il s'agit ici d'une masse minimale.

<u>Remarque</u> : *la formule générale donnant M_P est :* $M_P^3 = \frac{M_E^2 \times T_E \times V_E^3}{2\pi G}$. ■

LECTURE POUR LA MARQUISE

Histoire de la chute des corps d'Aristote à Einstein

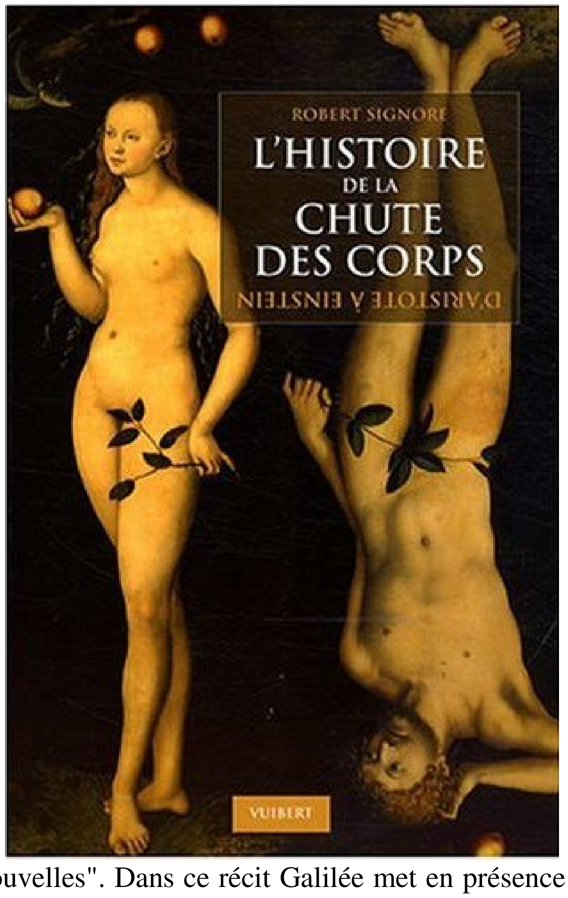
Robert Signore, Vuibert 2008

Ce petit livre de 150 pages pourrait se révéler fort utile aux professeurs de terminale S. Il s'appuie sur une étude historique concernant la chute des corps depuis Aristote jusqu'à Einstein. En choisissant de se limiter à la chute des corps à la surface de la Terre, c'est à dire en ne considérant qu'une seule direction de l'espace, l'auteur facilite notablement l'introduction, en fin d'ouvrage, de la Relativité restreinte.

Le livre est découpé en 4 parties : L'antiquité, Galilée, Newton, Einstein Les trois premières parties sont assez classiques, mais elles montrent la cohérence des différents modèles historiques. Ce n'est pas le fruit du hasard si les théories d'Aristote furent acceptées pendant des siècles. L'essentiel du livre est simple et qualitatif mais le lecteur qui désire approfondir l'aspect théorique et mathématique trouvera satisfaction dans les annexes.

Pour Aristote : *"Tout ce qui est mû est mû par quelque chose"* : chaque corps à la surface de la Terre possède un lieu propre. Si on éloigne un objet de ce lieu propre spontanément il cherchera à retrouver "sa place" et, comme pour les chevaux qui sentent l'écurie, d'autant plus rapidement qu'approche la destination finale.

Pour Galilée : l'auteur reprend surtout l'ouvrage de 1638 "Discours concernant deux sciences



nouvelles". Dans ce récit Galilée met en présence 3 personnages :
Salviati : porte-parole de Galilée ;

Sagredo : l'honnête homme qui cherche à comprendre ;
Simplicio : l'aristotélicien de service.
L'ouvrage de Galilée est d'une grande clarté à un point tel qu'en classe on peut demander aux élèves de se mettre dans la peau de chaque personnage soit en lisant certains passages soit, et c'est encore mieux, en reconstituant la plaidoirie comme ce fut le cas dans certaines écoles d'été du CLEA. Pour cela il suffit de définir trois équipes chargées de défendre les idées des trois personnages indiqués.
Pour Galilée chaque corps tombe sous l'effet d'une propriété intrinsèque, imprimé en lui.
Ce "moteur" est la gravité ou la légèreté.

Pour Newton la gravité n'est plus inhérente aux corps mais résulte d'une force extérieure.
La gravité est en quelque sorte "externalisée".
Cependant il faut noter que Newton ne raisonne pas en terme de "force physique" mais de "force mathématique". En page 90 l'auteur cite un passage des Principia dans lequel Newton dit :
"*…je considère ces forces mathématiquement et non physiquement ; ainsi le Lecteur doit bien se garder de croire que j'ai voulu désigner par ces mots une espèce d'action, de cause ou de raison physique ; et lorsque je dis que les centres s'attirent, lorsque je parle de leurs forces, il ne doit pas penser que j'ai voulu attribuer aucune force réelles à ces centres que je considère comme des points mathématiques " (L. I, Déf. VIII*, 7).
Dans le livre troisième des *Principes*, il écrit : "*…je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés de la gravité, et je n'imagine point d'hypothèses".*
En latin "Hypothèses non fingo".

La quatrième partie, celle consacrée à **Einstein,** est particulièrement intéressante.
L'auteur après avoir défini l'espace-temps de la relativité restreinte au voisinage de la Terre précise le "principe d'invariance". La relativité s'efforce de dégager des grandeurs indépendantes des observateurs, en particulier l'invariant (ds) que l'on appelle aujourd'hui "l'intervalle d'espace-temps".
Page 108 l'auteur précise *« qu'il n'est pas possible de représenter fidèlement l'espace-temps sur une feuille de papier, car celle-ci est, par nature, un espace euclidien où les distances sont déterminées par la relation de Pythagore. Il faut donc toujours interpréter les diagrammes d'espace-temps avec précaution.*
La ligne d'univers la plus droite est en même temps la plus longue. Cette ligne particulière constitue une "géodésique", si l'on généralise la définition classique d'une géodésique aux lignes de longueur extrême (la plus courte dans l'espace euclidien (est) *la plus longue dans le continuum d'espace-temps").*

À la fin du livre l'auteur étudie les actions qui s'appliquent à un fil à plomb selon la théorie de Newton et selon celle d'Einstein. Il fait remarquer que : "*Ce qui est **cause** dans l'un des fils à plomb est **effe**t dans l'autre et réciproquement".*
La même idée est illustrée, comme il se doit, à partir d'une pomme tenue par Ève. D'où la page de couverture du livre qui représente Adam et Ève ; un tableau de Lucas Cranach l'Ancien datant de1528. Ce tableau se trouve à la Galerie des Offices à Florence.
Ce livre passionnant est à recommander à tous ceux qui cherchent une méthode permettant d'introduire la relativité en classe terminale tout en s'appuyant sur l'histoire des sciences.

Christian Larcher

■

ÉCOLE D'ÉTÉ D'ASTRONOMIE

L'École d'Été d'astronomie du CLEA, se déroulera
du 17 au 24 août 2012 au col Bayard près de Gap.

Si vous n'avez jamais participé à une EEA, pour avoir un aperçu du contenu et de l'ambiance, visionnez la vidéo à l'adresse suivante :

http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea/

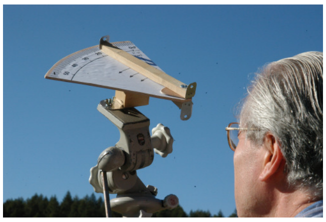
Sur la page suivante vous trouverez quelques informations sur le programme de cette année.

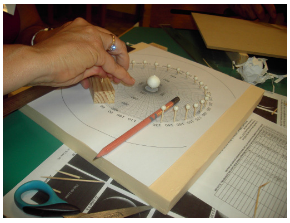
Qui anime les Écoles d'Été d'Astronomie ?
Des astronomes professionnels et des enseignants passionnés par l'astronomie et l'astrophysique.

Où se déroule l'EEA ?
Au centre d'oxygénation de Col Bayard, près de Gap, un lieu très agréable et propice à l'observation.

Qui participe aux Écoles d'Été d'Astronomie ?
Des professeurs des écoles, de collèges et de lycées de différentes matières et parfois aussi des animateurs. Souvent ils viennent y faire leurs premiers pas en astronomie.

Comment se déroule l'EEA ?
Elle est organisée autour de cours-conférences, d'observations et d'ateliers en petits groupes qui permettent des réalisations concrètes.





Quels thèmes seront abordés ?
Des thèmes liés aux nouveaux programmes de première et de terminale, mais aussi l'astronomie à l'école, le système solaire avec un zoom sur Mars, étoiles et énergie de fusion.

Et en prime …
La visite du Chantier d'ITER et de l'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement magnétique du CEA à Cadarache.

Voir la fiche d'inscription : http://www.ac-nice.fr/clea/UEA12Fic.html
Attention ! L.e nombre de places est limité.

Compte-rendu de l'assemblée générale du CLEA
Paris 20 novembre 2011

Les secrétaires : Jean-Luc Fouquet et Christian Larcher

Suite de l'article du CC n° 136 p. 39

Le bilan financier, par Roseline Jamet :

Jean Ripert, trésorier, est souffrant et remplacé dans cette présentation par son adjointe. Le nombre d'adhésions est plus important mais moins de documents ont été vendus cette année.
Le déficit de 4000 euros est dû essentiellement au subventionnement de l'école d'été. Plus de 50% des abonnés prennent le supplément "abonnement numérique". Un bulletin d'abonnement sera glissé dans les prochains Cahiers Clairaut, et une opération est aussi possible sur la liste de diffusion. La prochaine assemblée générale se fera fin janvier ou début février 2013 à Toulouse ou à Marseille, et les comptes financiers se feront dorénavant sur toute l'année civile.

COMPTE DE RÉSULTATS Nov 2010 - Nov 2011

CLEA Dépenses du 14 novembre 2010 au 20 novembre 2011 CCP

Cahiers Clairaut : **10 034,61 ;** communication (tirages, film) **800,90 ;** AG-2010 **2 508,61 ;** Assurance **271,03 ;** Fonctionnement : **3 655,07 ;** EEA-2010 : **15 164,75 ;** Investissement **2 022,64 ; Divers : 52,73**

TOTAL 34 510,34

CLEA Recettes du 14 novembre 2010 au 20 novembre 2011 CCP

Cahiers Clairaut 458 abonnés **11 910,00 ;** Adhésions 478 adhérents **2 390,00 ;** Ventes **2 469,00 ;** prestations **201,00 ;** centre Français de photocopie **55,29 ;** erreur CSA **19,73 ;** EEA 2011 **11 008,20 ;** AG 2010 **1 523,00**

TOTAL 29 576,22

CLEA Recettes du 14 novembre 2010 au 20 novembre 2011 Livret

intérêts 1 020,51

TOTAL 1 020,51

Bilan de nov 2010 à nov 2011

Dépenses : 34 510,34
Recettes : 30 596,73
Déficit de **3 913,61**

Solde nov 2010 73 655,00

nouvel avoir 69 741,39
perte sur l'année 2010 : -132,00 (4 abonnements non payés par Sweets)
Solde nov 2011 69 609,39

Rapprochement : CCP 6 nov 2011 ***4 167,98 ;*** *livret nov 2011* ***65 856,26*** *; Total* ***70 024,24***
recettes non encaissées : ***430,00*** *; dépenses non débitées :* ***844,85*** *; Total :* ***69 609,39***

L'école d'été 2011, par Danièle Imbault

Un bilan est rapidement présenté ainsi que l'organisation pédagogique autour de la thématique de cette année 2011, les trois thèmes des prochains hors séries, et les observations du soir. L'évaluation faite par les stagiaires est très positive. Un équilibre est encore à trouver dans les cours et dans les ateliers entre études théoriques et énoncés de base "sans formules".

Les productions pédagogiques, par Jean-Michel Vienney et Pierre Causeret

Sur le site du CLEA sont mises en place les premières photos permettant de suivre la rétrogradation actuelle de Mars. Un appel est lancé pour compléter la série. Sont ensuite présentés les trois hors séries, et plus particulièrement celui qui sera achevé début 2012 "Mathématiques et astronomie" (un fascicule et un DVD). Il est proposé d'ajouter à ce document le support d'un atelier « Puissances de dix » préparé précédemment.

Le site collaboratif du CLEA, par Charles-Henri Eyraud

La présentation commence par une explication de l'utilisation de l'onglet "accès réservé" pour les abonnés "numériques". Viennent ensuite des précisions sur les statistiques de fréquentation, sur le travail de numérisation des anciens articles, et sur le projet de vente en ligne (paiement par chèques uniquement pour l'instant). A la question "pourquoi deux sites pour le CLEA ?", il est répondu que le site de l'INRP deviendra peu à peu prépondérant, mais que le basculement du site de Nice sur celui de Lyon demande un très gros travail et ne peut être que progressif. Un exemple de présentation du site est donné avec des photos de Jupiter et de ses satellites, et de leur exploitation possible.

Le film publicitaire

Alexandre Bournery, réalisateur de films scientifiques, présente le clip de 4 minutes réalisé à partir des enregistrements faits lors de la dernière école d'été. Cette présentation a eu beaucoup de succès auprès de toute l'assistance. Une grande quantité d'information sur des ateliers entièrement filmés ou sur des "ressentis" pendant le stage restent à exploiter.

Interventions et conférence

Marie-Blanche Mauhourat, Inspectrice Générale de Physique-Chimie au MEN, nous fait l'honneur de sa présence et félicite le CLEA et tous ses membres pour la qualité de leur action pédagogique auprès des enseignants. S. Rodriguez (AIM) nous présente avec enthousiasme les derniers résultats sur "Titan, un monde vivant et complexe" observé par la sonde Cassini-Huygens. ■

Adhésion, réabonnement

Nous vous rappelons les tarifs

Adhésion simple : 5 €

Abonnement : 25 €

Adhésion + abonnement : 30 €

Adhésion + abonnement + abonnement numérique 35 €

Régler par chèque à l'ordre du CLEA

À adresser à : **Roseline Jamet**
83, rue Pierre Curie
33140 VILLENAVE D'ORNON

Solutions des mots croisés p. 21

Horizontalement

1. Parallaxes ; **2.** Arénaire (dans cet ouvrage, Archimède essaie de dénombrer le nombre de grains de sable qu'il faudrait pour remplir l'Univers) ; **3.** Six (les 5 planètes visibles à l'œil nu plus la Terre). al (année-lumière) ; **4.** SS. Météore ; **5.** Atterré. Mi ; **6.** Gars. Col ; **7.** Éros. Noir (le paradoxe d'Olbers pose la question de savoir pourquoi la nuit est noire) ; **8.** Squaws ; **9.** IMCCE ; **10.** Démentiels.

Verticalement

1. Passages ; **2.** Aristarque ; **3.** Rex (roi en latin, Céphée est le roi d'Éthiopie). Trou ; **4.** An. Message (Mercure est le messager des dieux) ; **5.** Laser ; **6.** Li (mesure chinoise de l'empire céleste). Transit ; **7.** Armée. Mi ; **8.** Xe. Circé (sorcière fille d'Hélios dans le mythe grec ou d'Hécate dans le mythe romain) ; **9.** Armor. Cl (de Na Cl) ; **10.** Soleil. Dés (Dieu ne joue pas aux dés, célèbre expression d'Einstein contre la physique quantique).