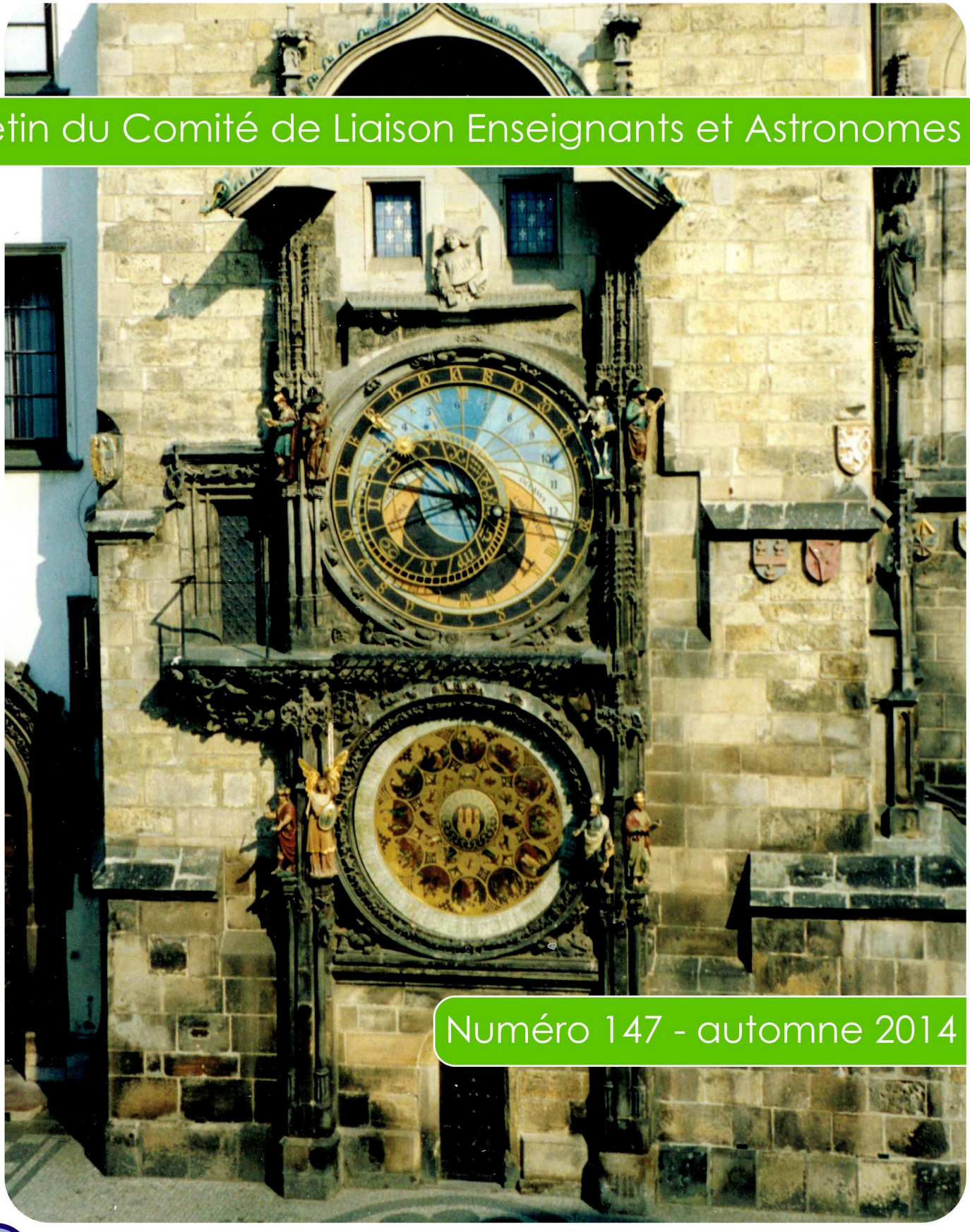
LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 147 - Septembre 2014 9 €



Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Numéro 147 - automne 2014

ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.
Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.
L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement…), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.
Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :
Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2014
Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Roseline Jamet
Trésorière adjointe : Sylvie Thiault
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjoint : Jean-Luc Fouquet

Responsables des groupes
Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
Communication : Charles-Henri Eyraud
École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault
Responsables du site :
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud

Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Jean Bazantay, Francis Berthomieu, Danielle Briot, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Vincent Deparis, Charles-Henri Eyraud, Alain Giraud-Ruby, Marc Lachièze-Rey, Christian Larcher, Pierre Magnien, Lionel Muller, Jean Ripert, Béatrice Sandré et Sylvie Yamazaki-Dubois.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 147, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Dans le CC 146, les photos du stage de Henday étaient de Brigitte Garreau et Gérard Pradignac.

Image de couverture :

Le beffroi de l'Hôtel de Ville de Prague comprend une horloge astronomique monumentale datant initialement de l'invention du mécanisme à foliot du début du 15e siècle. Maintes fois remise en état au cours des siècles elle comprend en bas un calendrier, à mi-hauteur un astrolabe avec deux automates de chaque côté (à droite la mort et la jalousie, à gauche l'orgueil et l'avarice). Elle donne les heures bohémienne, civile, sidérale, babylonienne et les positions du Soleil et de la Lune.
NDLR : voir un complément page 6.

Les Cahiers Clairaut

Été n° 147

Éditorial

Tempus et chronos ?

Désignons par **Tempus** le temps psychologique, celui familier à tout un chacun, ce temps qui n'existe que pour immédiatement s'évanouir. Ce temps d'aspect parfois rassurant mais le plus souvent inquiétant car chacun n'en dispose que d'une provision limitée et inconnue. Chaque instant présent vécu est déjà du passé.

Désignons par **Chronos** le temps du physicien, ce temps que l'on mesure sans trop savoir véritablement ce que l'on mesure en réalité.

Quel lien relie Tempus et Chronos ? Comment Tempus peut-il s'inviter chez Chronos ? H. Poincaré nous renseigne dans son livre « *La valeur de la science* » (1905) : *Le temps psychologique nous est donné et nous voulons créer le temps scientifique et physique*. Comment faire ? Sa réponse est claire : *le temps doit être défini de telle façon que les équations de la mécanique soient aussi simples que possible. En d'autres termes, il n'y a pas une manière de mesurer le temps qui soit plus vraie qu'une autre ; celle qui est généralement adoptée est seulement plus commode*. La mesure du temps est une question de convention.

Vous l'avez compris le thème de ce numéro concerne le temps, qui joue un rôle essentiel pour déterminer la longitude d'un lieu (p. 7), ou pour faire de l'astronomie, par exemple à partir du calendrier des Postes (p. 12) ou d'un simple dicton (p.19) et même en examinant un tableau anonyme conservé au musée des Beaux- Arts de Dijon… (p. 27). Il semble impossible d'échapper au temps mais vous verrez que la relativité peut s'en affranchir (p. 22).

Par ailleurs, avec vos élèves, refaites en vraies grandeurs des mesures de distance par triangulation comme Jean Picard au XVII^{e} siècle et demandez-leur de vérifier la mesure du rayon terrestre (p. 2).

Enfin, pour ceux qui l'ont connue, lisez l'hommage rendu à Françoise Suagher qui est partie le 24 juin dernier rejoindre les étoiles qu'elle aimait tant. Vous trouverez d'autres témoignages en allant sur le site du CLEA

AU REVOIR FRANÇOISE…

Christian Larcher, pour l'équipe.

Avec nos élèves
Mesure du rayon de la Terre
Vincent Deparis p 2

À propos de l'horloge de la couverture
Charles-Henri Eyraud p 6

Article de fond
Navigation et astronomie
Alain Giraud-Ruby p 7

Thème : LE TEMPS p 10
Notions de base
Pierre Causeret p 11

Avec nos élèves
Un peu d'astronomie à partir du calendrier : Terre et Lune
Danielle Briot p 12

Article de fond
La nature énigmatique du temps et les progrès dans la précision de sa mesure
Christian Larcher p 16

Mots croisés p 18

Avec nos élèves
L'affaire de la Sainte-Luce
Francis Berthomieu p 19

Article de fond
Le temps dans la relativité restreinte
Marc Lachièze-Rey p 22

Reportage
Le temps d'un tableau
Pierre Causeret p 27

Éclipse de Soleil du 20 mars 2015
Pierre Causeret p 28

Ciel de l'automne
Pierre Causeret p 30

Avec nos élèves
Le calendrier luni-solaire japonais
Sylvie Yamazaki-Dubois et Jean Bazantay p 31

Lecture pour la Marquise
Voyager dans le temps, Marc lachièze-Rey
L'exploration des planètes, Th. Encrenaz et J. Lequeux
Christian Larcher p 37

Vie de l'association
Hommage à Françoise Suagher
Pierre Magnien p 38

compte-rendu EEA
Lionel Muller p 39

Jeux
Solution des mots croisés p 40

AVEC NOS ÉLÈVES

Mesure du rayon de la Terre

Vincent Deparis
Lycée Jean Monnet – Annemasse (vincent.deparis@neuf.fr)

Après avoir mesuré la latitude de son lycée avec un groupe d'élèves, Vincent Deparis nous propose ici de retrouver le rayon de la Terre, travail effectué par 4 élèves dans le cadre des Olympiades de physique.
Un bel exemple de manipulation réalisée sur le terrain avec des élèves. Le plaisir de déterminer les dimensions de notre planète à l'aide de méthodes simples mais efficaces.

Mesurer la Terre est un projet ancien. La première tentative a été effectuée par Ératosthène, un savant du III^{e} siècle avant J.-C., vivant à Alexandrie en Égypte. De nombreux savants ont ensuite tenté d'améliorer la méthode employée. D'abord les astronomes arabes au IX^{e} siècle, puis les astronomes occidentaux à partir du XVI^{e} siècle. La première mesure précise est due à Jean Picard en 1669-1670. Dans le cadre de leur participation aux Olympiades de physique, quatre élèves (Jules Bazin, Florent Bonzon, Habibatou Diallo et Solenn Sarton) du lycée Jean Monnet à Annemasse ont voulu eux aussi relever le défi et déterminer la valeur du rayon terrestre en utilisant le matériel à leur disposition : un sextant, une mire de géomètre et un théodolite optique des années 1970, acheté 200 euros à un géomètre à la retraite. Pour le temps du projet, ils ont mis leurs pas dans les traces des anciens astronomes et se sont transformés en arpenteurs de la Terre.

Principe de la mesure du rayon terrestre

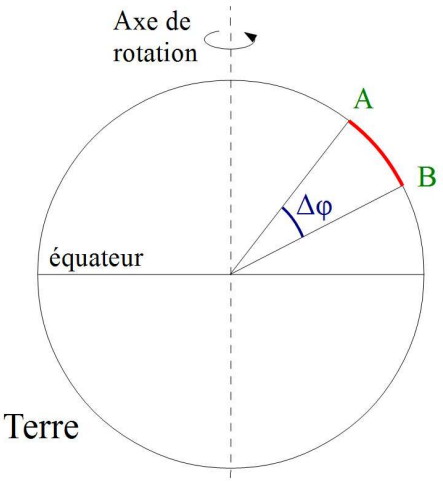


Fig.1. *Mesure du rayon terrestre.*

La méthode pour mesurer la Terre est simple en théorie. Elle implique deux types de mesures très différents (figure 1) :
- *des mesures astronomiques* pour déterminer la différence de latitude $\Delta\varphi$ entre deux lieux *A* et *B* d'un même méridien ;
- *des mesures géodésiques* pour déterminer la distance à la surface de la Terre entre les deux lieux *A* et *B*.

Connaissant la longueur de l'arc de méridien *AB* et la valeur de l'angle $\Delta\varphi$ correspondant, il est facile avec un produit en croix de calculer la valeur du périmètre de la Terre, puis en divisant par 2π de trouver la valeur du rayon terrestre. Les mesures astronomiques de latitude ne posent pas de soucis particuliers, nous avons appris à les effectuer avec un sextant, avec une assez bonne précision (voir Cahiers Clairaut n° 145). La difficulté principale provient des mesures géodésiques : comment mesurer une grande distance à la surface de la Terre ?

Mesure d'une distance à la surface de la Terre

Jean Picard est le premier à donner une valeur précise du rayon terrestre parce qu'il utilise avec succès la méthode de la triangulation géodésique. Celle-ci consiste à remplacer la mesure d'une grande distance par la mesure d'une plus petite distance et par la mesure d'une série d'angles dans des triangles. Nous allons nous aussi utiliser cette méthode : en partant d'une petite longueur connue (la mire de géomètre), nous allons progressivement l'agrandir jusqu'à atteindre une distance de 50 km environ en mesurant précisément des angles grâce au théodolite optique.

Longueur de la base

La première opération consiste à déterminer la longueur de la base de départ entre un point *A* (Andilly A) et un point *M* (Andilly *M*). Le point *M* est situé sur un petit monticule (réservoir d'eau), ce qui nous permet de nous positionner pour que la ligne *AM* soit pratiquement horizontale. Le théodolite est placé au point *A* et une mire de géomètre de 2,5 m de haut au point *M*. La règle possède un niveau à bulle pour qu'elle soit positionnée bien verticalement. Nous effectuons deux mesures (figure 3) :

- l'angle β_1 entre la verticale et la direction du point *M* : β_1 = 100,06 grades ;
- L'angle β_2 entre la verticale et la direction du point *N*, situé 1,90 m au-dessus du point *M* :

β_2 = 99,50 grades.

Fig.2. *Positionnement de la règle au point Andilly M.*

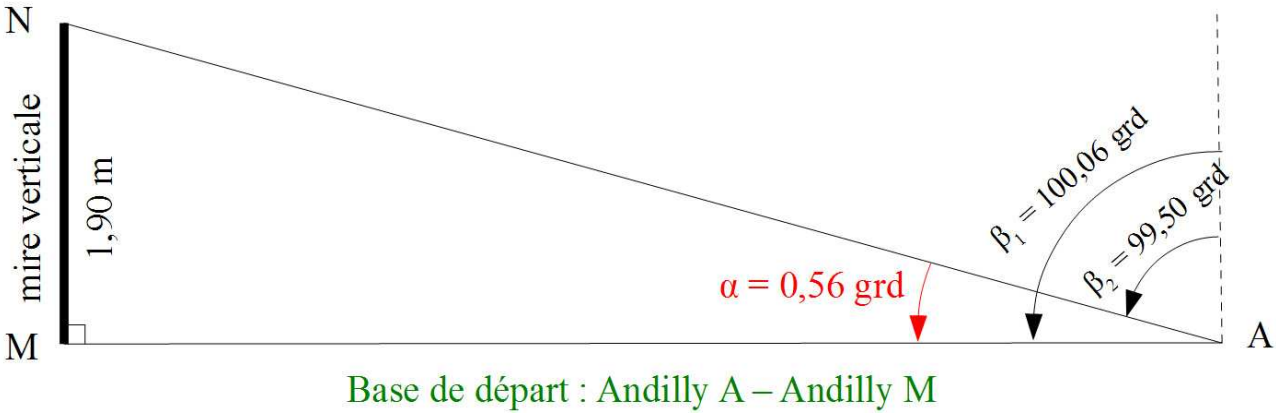


Fig.3. *Le point A est Andilly A et le point M, Andilly M. Le point N, un point de la mire, situé à 1,90 m au-dessus de M.*

Nos deux mesures permettent de déterminer l'angle α : $\alpha = \beta_1 - \beta_2$ = 0,56 grades = 0,504°.

En utilisant la trigonométrie, on peut calculer la distance *AM* :

$$AM = \frac{MN}{\tan \alpha} = \frac{1{,}90}{\tan 0{,}504} = 216\,\text{m}$$

Premier triangle

AndillyA-AndillyM-Salève

À partir de la base Andilly A - Andilly M, nous mesurons et construisons un premier triangle en visant le Salève, qui possède un petit monticule servant de point de repère.

Les points *A* (Andilly A) et *M* (Andilly M) ont été choisis à côté de repères restant à demeure : un

piquet indiquant un terrain d'aéromodélisme pour le point *A* et un panneau photovoltaïque pour le point *M*. Ils peuvent être visés depuis le Salève sans avoir besoin de laisser l'un d'entre nous pour tenir lieu de point de repère.

Fig.4. *Visée depuis le Salève.*

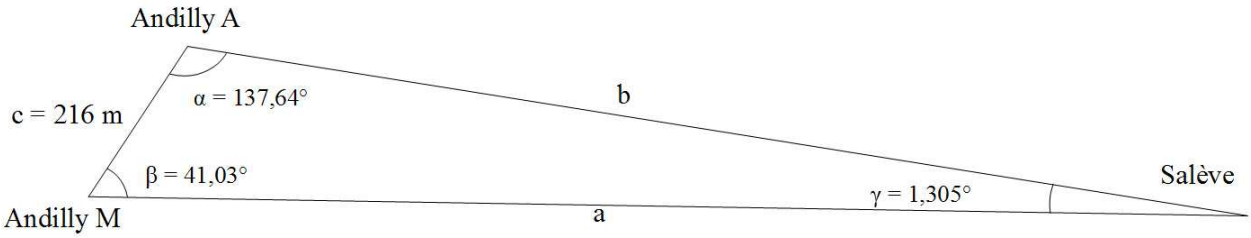


Fig.5. *Premier triangle.*

Nos mesures des trois angles du triangle sont les suivantes :

Mesure effectuée depuis	Angle (en grades)	Angle (en °)
Andilly A	152,935	137,642
Andilly M	45,59	41,031
Salève	1,45	1,305

En additionnant les trois angles du triangle, nous obtenons 179,978°. Comme la somme devrait être égale à 180°, nous avons commis une erreur de 0,022°. Puisque le côté Andilly A - Andilly M a une longueur connue, nous pouvons en déduire la longueur du côté Andilly A - Salève (figure 5). En effet, dans un triangle quelconque, la relation suivante est toujours vérifiée :

$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma}$$

soit,

$$b = \frac{c \times \sin\beta}{\sin\gamma} = \frac{216 \times \sin 41{,}03}{\sin 1{,}305} = 6226 \text{ m} = 6{,}226 \text{ km}$$

Orientation du côté Andilly A – Salève

La chaîne de triangles que nous allons construire à partir du côté Andilly A – Salève doit être orientée par rapport au méridien. Pour cela, nous orientons le côté Andilly A - Salève par rapport au sud en nous servant du Soleil. Le site internet de l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides) indique que pour notre lieu de mesure, le Soleil passe au sud à 11 h 34 min 47 s UTC le 4 septembre 2013. Le théodolite est placé à Andilly A et nous mesurons l'angle entre la direction du Salève et celle du Soleil, lorsqu'il passe au méridien. Nous trouvons un azimut de :

98,05 grades = 88,3°.

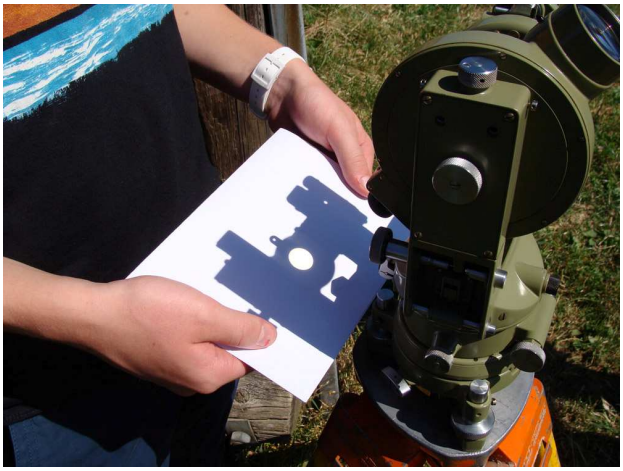


Fig.6. *Image du Soleil sur une feuille de papier.*

La chaîne de triangles jusqu'à la Croix du Nivolet

À partir de Andilly A et du Salève (situés au sud de Genève), nous construisons une chaîne de triangles qui nous amène jusqu'à la Croix du Nivolet, au-dessus de Chambéry. Les points visés constituent des repères bien marqués : une antenne (Chaumont), un pylône de télésiège (Semnoz), une table d'orientation (Clergeon) et une croix (Croix du Nivolet). La lunette du théodolite, qui a un agrandissement de 30, permet de faire des visées précises. Si possible, tous les angles des triangles doivent être mesurés car la comparaison de la

somme des trois angles d'un triangle avec 180° permet de vérifier la qualité des mesures. Malheureusement, les visées n'ont pas été possibles depuis l'antenne de Chaumont (il nous aurait fallu demander l'autorisation de grimper à l'échelle de l'antenne).

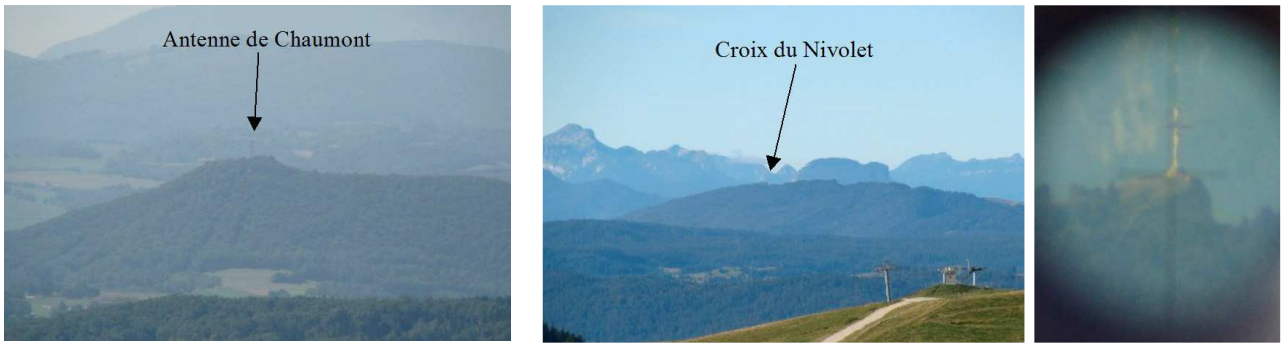


Fig.7. *Exemples de points de repère visés***.**

L'ensemble des angles des triangles et la connaissance de la longueur du côté Andilly A - Salève permet de construire la chaîne de triangles en utilisant le logiciel GeoGebra (figure 8). L'azimut du côté Andilly A – Salève permet d'orienter la chaîne par rapport au méridien.

En projetant le point correspondant à la Croix du Nivolet sur le méridien, nous obtenons le point B. Le point B a la même latitude que la Croix du Nivolet (il est situé sur le même parallèle) et il appar-tient au même méridien que Andilly A. Le logiciel GeoGebra permet de voir que la distance Andilly A - point B est 8,24 fois plus grande que la distance Andilly A - Salève.

Puisque cette dernière est de 6,226 km, la distance entre les points extrêmes de la triangulation est :

Andilly A – Andilly B
= 8,24 × 6,226
= 51,30 km

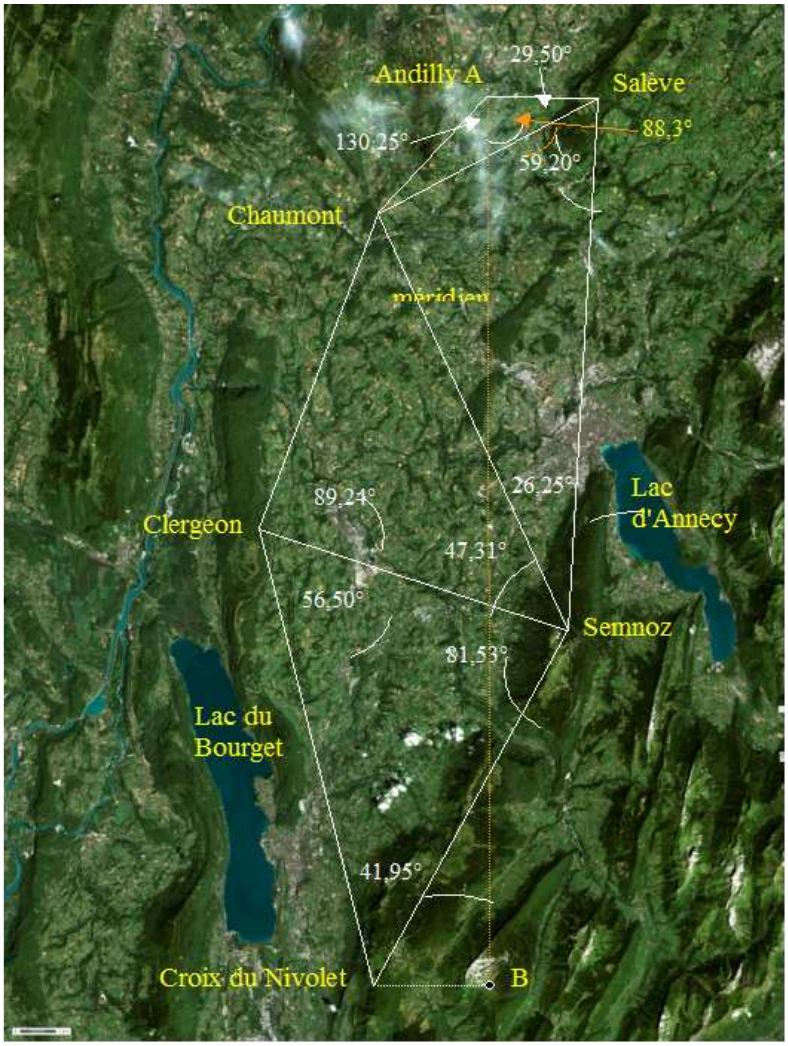


Fig.8. *La chaîne de triangulation.*

Différence de latitude entre les lieux extrêmes de la triangulation

En mesurant, à l'aide d'un sextant, la hauteur du Soleil au midi solaire (passage au méridien) aux deux extrémités de la triangulation, il est possible d'obtenir la latitude des deux lieux. Puisque nous nous intéressons à une différence de latitude, il n'est pas nécessaire de tenir compte de la réfraction atmosphérique (supposée égale lors des deux

mesures). Nous trouvons que la différence de latitude entre *Andilly A* et la *Croix du Nivolet* est égale à 0,475°. Notre triangulation s'étend donc sur environ 1/2° du méridien.

Calcul du rayon terrestre et influence des différentes grandeurs mesurées

Puisque la différence de latitude entre *Andilly A* et le *point B* est de 0,475° et que la distance entre ces deux lieux situés sur un même méridien est de 51,30 km, nous pouvons en déduire que le périmètre de la Terre est de 38 880 km. En divisant par 2π, nous obtenons le rayon de la Terre, soit 6 190 km. Comme la valeur communément admise est de 6 371 km, nous sommes à moins de 200 km de la valeur réelle, soit une erreur de 3 %.

Notre détermination du rayon terrestre fait intervenir un grand nombre de mesures : différence de latitude, longueur de la base, premier triangle, chaîne de triangulation, orientation de la chaîne. Parmi toutes ces grandeurs, lesquelles sont les plus déterminantes pour la précision du résultat final ? Nous estimons grossièrement la précision de chacune des mesures : la différence de latitude est précise à 1', les angles mesurés au théodolite sont précis à 0,01° (ce qui est confirmé par le calcul de la somme des trois angles d'un triangle), la longueur de 1,90 m sur la mire vue à travers le théodolite est précise à 2 cm. Avec ces estimations, nous voyons que trois grandeurs sont prépondérantes :

- la différence de latitude : une erreur de 1' occasionne une erreur de 200 km sur le calcul du rayon !
- la longueur de la base : une erreur de 2 cm sur la mire occasionne une erreur de 70 km sur le calcul du rayon ;
- l'angle γ du premier triangle : une erreur de 0,01° occasionne une erreur de 50 km sur le calcul du rayon (le premier triangle, contrairement aux suivants, est très allongé, d'où sa plus grande influence).

Notre résultat final est donc de 6 200 ± 400 km. Avec le matériel à notre disposition, il est difficile de faire mieux ! Il faudrait mesurer plus précisément la différence de latitude, en utilisant les étoiles, augmenter la longueur de la base et la mesurer en utilisant les dispositifs modernes (temps de parcours d'une onde infrarouge) et prolonger la chaîne de triangulation pour mesurer un arc de méridien plus grand. Rivaliser avec Jean Picard n'est donc pas une mince affaire ! Mais comme lui et comme tous les astronomes géodésiens du XVIII^{e} siècle, nous avons pu arpenter la Terre, chercher un lieu propice à la triangulation, sélectionner les sommets des triangles, réaliser l'ensemble des mesures, transpirer pour porter les instruments aux lieux de mesure lorsque ceux-ci n'étaient pas à proximité des voies de communication (Croix du Nivolet). Bref, faire avec un grand plaisir, de la science en dehors des bancs de l'école !

Fig.9. *Montée au Semnoz.*

■

À propos de l'horloge de la couverture

L'astrolabe donne de nombreuses indications astronomiques (du cadran extérieur vers l'intérieur) :

- l'heure bohémienne (en chiffres arabes gothiques), c'est-à-dire le nombre d'heures écoulées depuis le coucher du Soleil avec 24 heures égales pour la durée du jour) ;
- l'heure civile (en chiffres romains) : en principe ce devrait être l'heure solaire, mais la plupart des horloges astrolabiques monumentales indiquent l'heure légale du pays pour des raisons pratiques ;
- l'heure sidérale (aiguille portant une petite étoile) lue sur le même cadran que l'heure civile ;
- l'heure babylonienne (en chiffres arabes) : c'est le nombre d'heures écoulées depuis le lever du Soleil : il s'agit d'heures "inégales" dont la durée varie avec les saisons avec 12 h de jour, 12 h de nuit ;
- la position du Soleil sur le zodiaque ;
- la phase et la position de la Lune sur le zodiaque.

HISTOIRE

Navigation et Astronomie

Alain Giraud-Ruby(1)

Cet article relate les tribulations des recherches destinées à mettre au point une méthode fiable de détermination de la longitude des vaisseaux en haute mer.

La mesure de la longitude est indissociablement liée à la mesure du temps puisque que la Terre tourne sur elle-même, alors que celle de la latitude n'est qu'une affaire locale (hauteur des étoiles ou du Soleil au dessus de l'horizon, corrigées de leur déclinaison, lors de leur culmination). La détermination de la longitude par rapport à un méridien de référence exige la connaissance non seulement de l'heure locale mais aussi, simultanément, de l'heure sur le méridien de référence ; elle s'en déduit alors par une simple soustraction, à raison de quinze degrés de longitude par heure de différence. Une erreur d'une seconde de temps entraîne une erreur d'un quart de mille nautique sur l'équateur, soit près d'un demi kilomètre, ce qui donne une idée de la précision requise.

On sait que la mise au point des méthodes de mesure de la longitude a revêtu une importance stratégique extrême, puisqu'elles sont à la base de toutes les cartes, marines ou terrestres (les « atlas »), et de tout ce qui en a dépendu dans l'Histoire, ainsi que, corrélativement, de la sûreté de la navigation, en mer (et sur terre), pour les explorateurs, les conquérants, les militaires, les marchands et les ingénieurs qui ont accouché du monde moderne à partir de la Renaissance.
Ce qu'on sait moins c'est que cette mise au point, du dix-septième au vingtième siècle, a joué un rôle moteur prépondérant dans le développement des sciences, inspirant notamment l'épanouissement de l'astronomie à l'âge classique et contribuant à la révolution relativiste vers 1900.

L'heure locale, comme la latitude, pouvait être mesurée à partir du relevé de la culmination des astres (et conservée un certain temps à l'aide d'un sablier de marine), et pendant de nombreux siècles, l'heure du méridien de référence ne pouvant être ni conservée ni transmise, on ne disposait également pour la déterminer que de méthodes purement astronomiques.

La plus ancienne méthode pour déterminer la longitude, remontant à Hipparque dans l'Antiquité hellénistique, est fondée sur la prévision des éclipses de Lune, le début ou la fin du phénomène, visible de tout un hémisphère, fournissant un signal horaire universel. Avec la détermination de la taille de la Terre par Érathostène, qui permettait de passer des coordonnées angulaires aux distances à la surface du globe, il devint possible d'établir ainsi à la longue les premières cartes géographiques (encore très grossières) de l' « oecoumène » - le monde connu - comme celles que publia Ptolémée au deuxième siècle de notre ère.

Cette ancienne méthode était encore la seule utilisable au quinzième siècle, et c'est celle, (sur le conseil des savants de l'université de Salamanque qui lui avaient fourni avant son départ les éphémérides de Regiomontanus), qu'utilisa Christophe Colomb grâce à l'éclipse de Lune de septembre 1494 qu'il observa de l'île d'Hispaniola (Saint Domingue). Les erreurs d'observation, s'ajoutant au caractère très approximatif des globes ou planisphères dont il disposait - sur lesquels et pour cause les Antilles ne figuraient pas - étaient telles qu'il pût initialement croire de bonne foi être arrivé au Japon, en Chine ou aux Indes…

Néanmoins, lorsqu'on se fut avisé qu'il avait en fait découvert entre l'Europe et l'Asie des « Indes de l'Ouest » - qu'on imagina tout d'abord comme un immense archipel -, c'est sur une mesure de longitude que fut fondé en 1502 le partage de ce nouveau monde entre le Portugal (qui reçut la partie Est, essentiellement le Brésil) et l'Espagne (partie Ouest), par le traité de Tordesillas. Et c'est pour éclaircir la question de ce qui se passait aux antipodes - du côté des fabuleuses « îles aux épices », les Moluques (l'Indonésie) -, que fut entrepris le voyage de Magellan.
Au seizième siècle les géographes, compte tenu de l'importance du problème de la longitude, en particulier pour l'établissement de cartes par

(1) Auteur d'une Histoire de l'Astronomie (« Le Ciel dans la tête ») publiée chez Actes Sud. On trouvera dans cet ouvrage des développements plus détaillés et des références se rapportant aux thèmes évoqués dans le présent article.

l'atelier de Mercator, se mirent au travail et inventèrent deux autres méthodes de mesure qui, bien que parfaitement valables en théorie et potentiellement bien plus précises, devaient rester inutilisables encore plus de deux siècles compte tenu des difficultés pratiques à résoudre.

Gemma Frisius suggéra que les progrès de l'horlogerie allaient permettre de transporter l'heure du méridien origine grâce à des « garde-temps » fiables. C'est ce qui devait effectivement arriver, mais après les longues tentatives infructueuses de Huygens avec sa pendule à échappement à la fin du dix-septième siècle il fallut les laborieux exploits techniques de l'horloger anglais Harrison dans les années 1730-50 pour disposer de tels instruments, capables de compenser les mouvements du navire et les effets des changements de température. En fin de compte ce n'est pas avant la deuxième moitié du dix-huitième siècle que les chronomètres de marine parvinrent enfin à une précision suffisante pour garder le temps pendant les tribulations de semaines et de mois en mer ; encore fallut-il le vérifier, ce qui demanda encore de nombreux travaux lors de plusieurs expéditions océaniques, notamment les voyages du capitaine Cook dans le Pacifique.

Johannes Werner avait de son côté proposé d'utiliser comme horloge universelle le mouvement de la Lune dans le ciel : pas la peine pour disposer d'un signal horaire d'attendre les rares occasions où elle passe dans l'ombre de la Terre, il suffisait de relever le moment ou elle éclipsait des étoiles ou tout simplement l'angle séparant le bord lunaire d'étoiles utilisées comme repères. Mais là encore il fallut patienter plus de deux siècles pour améliorer suffisamment la précision des cartes du ciel et des prévisions des « inégalités » du déplacement de la Lune. Sans parler de la solution du problème de la « parallaxe lunaire » (on ne voit pas de partout la Lune au même endroit du ciel étoilé, et il faudrait déjà savoir où l'on est pour effectuer cette correction !), problème ardu déjà noté par Apian, auquel ne s'attaquèrent les mathématiciens français Morin puis Maupertuis qu'au dix-septième siècle.

Cependant, après le désastre de l'Invincible Armada en 1588 (quatorze naufrages sur les côtes d'Irlande dus aux cartes fautives et à l'impossibilité de repérer avec exactitude la position des navires) le roi d'Espagne, bientôt suivi par les souverains des autres puissances maritimes, avait mis au concours « la longitude ». Parmi beaucoup d'autres propositions, plus ou moins farfelues, l'utilisation du magnétisme par la mesure de la direction du champ magnétique terrestre, étudiée notamment par William Gilbert en Angleterre et Guillaume Le Nautonier en France, souleva de grands espoirs ; à la fin dix-septième siècle Edmond Halley entreprit de cartographier la déclinaison magnétique sur tout l'océan Atlantique. Mais on devait s'apercevoir que le champ magnétique terrestre n'est pas stable, dérivant de façon continue, et que la précision de la localisation était de toute façon insuffisante.

Entre temps, une nouvelle méthode astronomique, promise à un grand avenir, avait été proposée par le mathématicien de la cour de Florence, Galileo Galilei, en 1612. Après avoir découvert, à la lunette, les satellites de Jupiter et observé qu'ils étaient fréquemment éclipsés en passant dans l'ombre de la planète, Galilée s'était rendu compte que ces éclipses pouvaient fournir un signal horaire plus facilement prévisible et plus pratique que celles des étoiles par la Lune. Bien que la méthode se soit avérée inutilisable en mer, c'est celle-là qui, à terre, allait permettre le progrès considérable de la cartographie à partir du dix-septième et jusqu'au dix-neuvième siècle. Il s'agit là, à coup sûr, d'une des plus remarquables conséquences du génie de Galilée qui énonçant le principe de cette méthode, permettra au jeune et ambitieux savant de Bologne, Gian-Domenico Cassini d'entreprendre, d'établir et publier des tables prévisionnelles des éclipses des satellites de Jupiter. Ce travail n'échappa pas à Jean Picard, conseiller de Colbert. Ceux-ci invitèrent Cassini à venir à Paris où il s'installa en 1669 et fut bientôt chargé de la création d'un observatoire astronomique dans le bâtiment construit pour l'Académie royale des Sciences.

Les tables de Cassini montraient des « anomalies » de période quasi annuelle - l'occurrence des éclipses avançant quand la Terre se rapprochait de Jupiter et retardant quand elle s'en éloignait. On sait que le danois Roemer et le hollandais Huygens, également en résidence à l'observatoire de Paris, en déduisirent une première évaluation de la vitesse de la lumière.

Les travaux de Picard, La Caille et des Cassini (le fils, le petit-fils et l'arrière petit-fils de Jean-Dominique lui succédèrent à l'observatoire) spécialisèrent l'astronomie française en géodésie et il devait en résulter, ainsi que l'avait souhaité Colbert, l'établissement des premières cartes exactes, notamment celles du royaume de France et de ses colonies - ancêtres des cartes d'état-major et de nos cartes I.G.N. Plus tard, pendant la Révolution, cette spécialité des astronomes français contribuera à l'élaboration du système métrique,

fondé sur la définition (la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre) et la mesure, par Delambre et Méchain, du mètre étalon.
Tandis qu'à l'observatoire de Paris on perfectionnait ainsi la cartographie et la géodésie terrestre, les anglais de leur côté s'étaient attachés à résoudre le problème de la longitude en mer. John Flamsteed, persuadé que la méthode des distances lunaires était la bonne, avait formé le projet de faire de meilleurs relevés des positions des étoiles que tous ceux dont on disposait jusque là, afin de relever ensuite et de pouvoir prévoir avec précision les déplacements de la Lune. Il réussit à convaincre le roi Charles II de lui faire construire dans ce but un observatoire, et devint ainsi, en 1675, le premier *Astronomer royal*, directeur de Greenwich. Le programme qu'il s'était fixé était ambitieux, de longue haleine, et ne devait aboutir que bien longtemps après sa mort.

En fait, c'est un désastre maritime aux îles Scilly, provoquant en Angleterre la même réaction que celui que l'Invincible Armada avait provoqué en Espagne plus d'un siècle auparavant, qui vint relancer les travaux sur la longitude. En 1714 le Parlement vota le *Longitude Act* [1] prévoyant une récompense considérable au découvreur et créant une commission-arbitre spécialisée, le *Longitude Board*, auquel fut notamment nommé Isaac Newton, alors au fait de sa gloire et qui travaillait à sa « théorie (des mouvements) de la Lune » (le fameux « problème des trois corps »). Le catalogue d'étoiles de Flamsteed fut finalement complété, après les observations de Halley et Bradley, successeurs de Flamsteed, par d'excellentes prévisions des déplacements lunaires dues à Tobias Meyer de Göttingen. C'est seulement le quatrième *Astronomer-royal*, Maskelyne, qui put démarrer la publication du *Nautical Almanach* grâce auquel, à l'aide du sextant récemment inventé par Hadley, des chronomètres de Harrison et de tables de calculs logarithmiques, les navigateurs britanniques dès les guerres napoléoniennes allaient assurer leur maîtrise des mers et conquérir l'empire « sur lequel le Soleil ne se couche jamais ».

Après l'audition d'un rapport de l'abbé Grégoire, conscient du retard français, le Bureau des longitudes fut créé par la Convention le 7 messidor de l'an III (25 juin 1795). Il fut chargé de la tutelle de l'astronomie française et de la publication d'éphémérides, *La connaissance des temps*. Mais si la France put faire valoir l'excellence de ses astronomes-géodésiens avec le système métrique et le mètre étalon, elle ne rattrapa jamais son retard en matière de longitude et c'est la Grande Bretagne qui devait faire prévaloir celle de ses astronomes-horlogers avec le choix international du méridien origine et de l'heure universelle de Greenwich lors du congrès de Washington en 1884.

À la fin du dix-neuvième siècle le télégraphe électrique, puis au début du vingtième la radio, allaient fournir de nouvelles méthodes de localisation, développées notamment par Henri Poincaré, membre puis président du Bureau des Longitudes. C'est en réfléchissant à la transmission d'un signal horaire à la vitesse de la lumière et à la question de la simultanéité que celui-ci élabora une théorie de la relativité avant même Einstein. (Ce dernier à Berne aboutit à la sienne, on le sait, en se posant les mêmes questions de son côté au sujet de la synchronisation électrique à distance des horloges de chemin de fer).

Juste retour des choses, la mise au point dans les années 1960 du système spatial G.P.S. par le physicien américain Fanelli ne permet d'atteindre l'extraordinaire précision (de l'ordre de la dizaine de milliardième de seconde de lumière, soit du mètre) dont on dispose aujourd'hui en matière de localisation sur le globe, que grâce à des corrections relativistes qui constituent la seule application pratique de la théorie de la relativité…

Ainsi, pendant près de quatre siècles, les plus grands savants ont travaillé sur les problèmes de la détermination de la longitude : Galilée, Huygens, Newton, Poincaré. Outre la fondation des premiers observatoires astronomiques modernes, le long cours des diverses solutions de ces problèmes a été jalonné par quelques-unes des plus grandes percées scientifiques (la vitesse de la lumière, le géomagnétisme, les théories de la Lune, la première théorie de la relativité) et par des progrès techniques et normatifs marquants (l'horlogerie de précision, le système métrique, le temps universel). Peut-être plus étonnant encore, ce problème de la longitude a inspiré - de Philippe II d'Espagne au *Longitude Act* britannique et au Bureau des Longitudes de l'abbé Grégoire - les premiers grands programmes de recherche orientée, parmi les plus durables et les plus féconds.

■

[1] Une magnifique exposition au *Maritime Museum* de Greenwich, sur les bords de la Tamise au pied de l'observatoire, commémore jusqu'au 4 janvier 2015 le tricentenaire du *Longitude Act*. Intitulée « *Ships, Clocks and Stars* », cette exposition permet d'admirer les originaux des documents, instruments et portraits des acteurs de cette histoire, qui sont reproduits et commentés dans un superbe catalogue.

LE TEMPS

Instruments pour mesurer le temps ? Des durées ? Pour fixer un instant ?

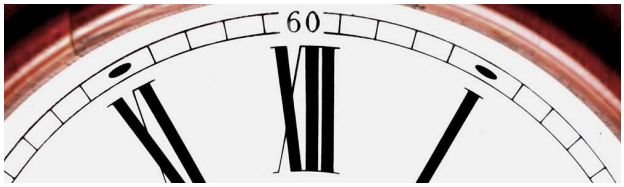
Mais qu'est-ce que le temps ? Existe-t-il ?

En haut cadran solaire horizontal, (les heures sont marquées par des oliviers Buera, Aragon), anneau astronomique, montres, chronomètres, nocturlabe.
Photos J. Ripert

Les unités de mesure du temps

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Les Cahiers Clairaut ont déjà abordé les calendriers et l'origine astronomique du jour, du mois et de l'année (voir CC n° 136). Mais nous n'avons alors pas parlé des autres unités de mesure du temps, l'heure, la minute et la seconde. On sait que 1 jour = 24 h, 1 h = 60 min. D'où viennent ce 24 et ce 60 ?



Il y a quelques millénaires, les Mésopotamiens ont partagé le jour en 12 parties égales, chacune de ces parties équivalent à deux de nos heures. Pourquoi 12 ? L'explication reste incertaine.
On peut imaginer une origine astronomique, par analogie avec l'année qui compte un peu plus de 12 lunaisons. Mais l'origine peut aussi être anatomique : on compte facilement jusqu'à 12 en posant le pouce sur l'une des phalanges d'un doigt de la même main (4 doigts possédant 3 phalanges chacun). On retrouve ce 12 non seulement dans les 12 heures de la pendule mais aussi dans la douzaine d'œufs, la douzaine d'huîtres…

Les Babyloniens comptaient en base 60 et non en base 10 comme on le fait habituellement. L'origine de cette base reste mystérieuse. Georges Ifrah[1] imagine qu'elle pourrait provenir de la symbiose de deux cultures, l'une comptant en base 5 (comme les 5 doigts de la main), l'autre en base 12. Il est d'ailleurs très facile de compter jusqu'à 60 avec deux mains : l'une compte de 1 à 12 en posant le pouce sur une phalange et l'autre comptabilise les douzaines avec un doigt. 5 douzaines = 60, le tour est joué.

Cette base 60 est à l'origine de nos minutes (une minute = un soixantième d'heure) et de nos secondes (une seconde = un soixantième de minute). On retrouve cette base 60 dans les degrés partagés en 60 minutes d'arc, chaque minute étant partagée en 60 secondes d'arc. Ce système était utilisé par les Grecs depuis au moins le IIe siècle avant notre ère.

Mais revenons aux heures. Après avoir partagé le jour complet en 12, les Babyloniens ont divisé en 12 la journée (du lever au coucher du Soleil) ainsi que la nuit. Le jour complet était alors découpé en 24 parts inégales : au printemps et en été, les heures de jour étaient plus longues que les heures de nuit ; c'était l'inverse en automne et en hiver. On parle alors d'heures temporaires ou inégales. Les Égyptiens ont adopté le même système.

Ces heures inégales sont difficilement compatibles avec des marqueurs de temps réguliers comme les clepsydres (horloges à eau) ou plus tard, les horloges mécaniques. Si on partage un jour en 24 parts identiques, on obtient ce qu'on appelle des heures égales ou équinoxiales (à l'équinoxe, les heures temporaires de jour ou de nuit sont égales). Ce sont ces heures qui sont indiquées par une horloge mécanique.

À la révolution française, on tenta de décimaliser les heures avec des jours de 10 heures, des heures de 100 minutes et des minutes de 100 secondes. Mais contrairement au système métrique qui finit par s'imposer, les heures décimales furent vite abandonnées. Dommage pour nos écoliers, les calculs de durée auraient alors été beaucoup plus simples…

Une horloge avec un cadran de 10 heures dont l'aiguille tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (Musée de l'horlogerie de Morteau - Doubs).

Un peu de typographie

On utilise les abréviations h pour heure (et non H), min pour minute (et non mn comme on le voit trop souvent !) et s pour seconde (et non sec). Le décret de 1975 accepte m pour minute quand il ne saurait y avoir d'ambiguïté, ce que font souvent les astronomes, mais ce n'est pas l'abréviation officielle du SI.
Les notations ' et " ne doivent s'employer que pour les minutes et secondes d'angle.
Une abréviation ne prend jamais la marque du pluriel.
L'unité est toujours précédée d'une espace (sauf pour °).
On écrit donc par exemple 5 h 25 min 30 s.

[1] Histoire universelle des chiffres, chez R. Laffont.

AVEC NOS ÉLÈVES

Un peu d'astronomie à partir du calendrier : Terre et Lune

Danielle Briot, observatoire de Paris

Le calendrier des postes reste une ressource intéressante pour qui s'intéresse à l'astronomie. Danielle Briot nous propose quelques exemples d'utilisation avec des enfants.

L'écoulement du temps peut être apprécié par deux processus différents, d'abord par le temps correspondant à une évolution, une usure (les plantes, les animaux, les hommes naissent, grandissent, vieillissent et meurent), et ensuite par les phénomènes cycliques astronomiques correspondant aux spécificités de notre planète et de ses mouvements. Le jour, ou plus exactement la succession des jours et des nuits, provient du mouvement de rotation de la Terre sur elle-même et l'année est déterminée à partir du mouvement de la Terre autour du Soleil. C'est à partir de ces deux mouvements qu'est principalement établi notre calendrier, mouvements auxquels il faut ajouter ceux de notre satellite la Lune. Puisque le calendrier qui nous sert à nous repérer dans le temps est basé sur les mouvements des astres qui nous concernent le plus et dont dépendent complètement notre vie quotidienne et notre métabolisme, on peut faire jouer le processus inverse : à partir des données du calendrier, on peut retrouver certaines caractéristiques de ces mouvements.

Ainsi, le calendrier permet de réaliser avec les élèves de très intéressants exercices sur l'astronomie. L'Almanach du Facteur longtemps connu comme le Calendrier des Postes est le plus adapté à cette étude. On demande aux élèves d'apporter en classe un exemplaire de ce calendrier s'ils en ont un chez eux. Il semblerait cependant qu'il soit moins diffusé actuellement qu'il ne le fut naguère. Si le nombre de calendriers disponibles est insuffisant, on utilisera des photocopies, mais il est évidemment plus « pittoresque » de travailler sur le calendrier lui-même et la coexistence de différentes éditions permet d'intéressantes comparaisons. Certains travaux en classe peuvent être réalisés en utilisant les informations portées sur le calendrier lui-même (partie extérieure, cartonnée et illustrée) alors que d'autres recherches demandent d'utiliser une des feuilles portées à l'intérieur du calendrier : celle qui donne les heures de levers et couchers de Soleil et de Lune pour Paris. Notons que les données des levers et couchers du Soleil et de la Lune sont fournies par l'Institut de Mécanique Céleste et de Calculs des Éphémérides (IMCCE) de l'Observatoire de Paris, et sont donc aussi précises et fiables que possible, alors que sur la même feuille figurent des prévisions météorologiques qui, avec un an d'avance et sans préciser quelles parties de la France sont concernées, ne présentent évidemment aucun caractère de sérieux.

Notons aussi que le mot *jour* que nous aurons à utiliser dans ce texte a en français plusieurs sens différents : cela peut correspondre au temps écoulé entre le lever et le coucher du Soleil et alors s'opposer à la nuit, ou ce peut être le laps de temps de 24 heures correspondant à un jour (dans le sens défini ci dessus) plus une nuit. Pour éviter toute équivoque on peut utiliser le mot *nycthémère*, mot formé des mots *nuit* et *jour* en grec, pour l'intervalle de temps de 24 heures. Il n'échappera cependant à l'esprit de personne que le mot en question ne peut pas être utilisé dans certaines classes sans un minimum de précautions. Il est probablement plus simple d'utiliser le mot *journée* pour s'opposer à *nuit*. C'est ce que nous ferons ci-après, si besoin est.

Mouvement de la Terre dans l'espace - Les saisons

L'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique (plan dans lequel s'effectue sa trajectoire) mais en diffère de 23° 26'. C'est cette inclinaison qui est à l'origine des saisons. Le moment où l'extrémité de l'axe de la Terre correspondant au pôle Nord est inclinée vers le Soleil correspond à la journée la plus longue et à la nuit la plus courte dans l'hémisphère nord. C'est le solstice et c'est ce qui est défini comme le début de l'été dans notre hémisphère, et le début de l'hiver dans l'hémisphère sud. Cela se produit le 20 ou le 21 juin. Cela peut paraître paradoxal, mais quand l'été arrive les jours raccourcissent. On peut insister auprès des élèves sur l'opportunité de se méfier des idées reçues… On pourrait supposer qu'il fait plus chaud au début de l'été lorsqu'un élément de surface de la Terre reçoit plus de rayonnement du Soleil. Cependant une certaine inertie thermique dans l'atmosphère, les océans et les continents implique que la température

maximale au cours de l'année ne se produit pratiquement jamais le 21 juin.
De la même façon, le début de l'hiver est fixé au moment où le jour est le plus court et la nuit la plus longue dans notre hémisphère. De nouveau, on rencontre ce qui peut apparaître comme un paradoxe : c'est l'hiver, les jours rallongent. Ce jour est actuellement le 21 ou 22 décembre. Le début du printemps et le début de l'automne sont fixés aux équinoxes, moments où, sur toute la Terre le jour dure 12 heures et la nuit 12 heures. Dans l'hémisphère nord, l'équinoxe de printemps a lieu actuellement le 20 mars, et l'équinoxe d'automne le 22 ou 23 septembre. Les solstices et les équinoxes sont représentés le plus souvent comme ce que l'on peut voir sur la figure 1.

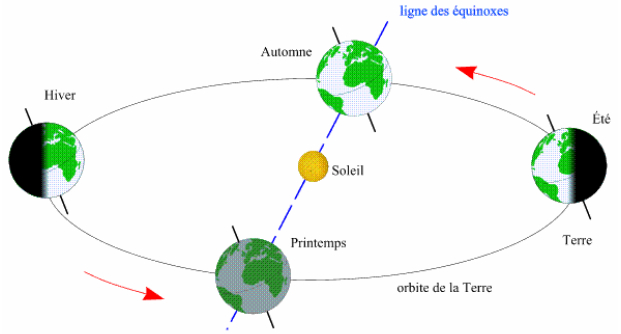


Fig.1. *Le mouvement de la Terre autour du Soleil avec les équinoxes et solstices, début de chacune des saisons dans l'hémisphère nord (schéma IMCCE).*

Il faut noter cependant que ce type de figure est représenté en « perspective cavalière ». Il peut arriver que les élèves en concluent que le mouvement de la Terre est très elliptique et que le Soleil se trouve au centre de cette ellipse. Nous donnons également une autre figure, que l'on trouve plus rarement, vue « d'au dessus » et prise dans « L'Astronomie Populaire » de Camille Flammarion (figure 2).

À première vue, l'on pourrait supposer que les deux solstices et les deux équinoxes coupent l'année en quatre parties de durées égales. Tous les calendriers donnent la date du début de chacune des saisons, et l'Almanach du facteur donne même les heures, ce qui permet un calcul plus précis. Un calcul minutieux permet alors, en tenant compte du nombre de jours de chaque mois, de calculer la longueur de chacune des saisons. On constate alors que le printemps et l'été dans notre hémisphère sont plus longs que l'automne et l'hiver.
Les quatre saisons seraient de longueur égale si la trajectoire terrestre était parfaitement circulaire. Or cette trajectoire est très légèrement elliptique. Bien sûr, rien de commun avec la valeur de l'ellipticité « fictive » représentée sur la figure 1.
Référons nous aux célèbres et toujours très utiles lois de Kepler.

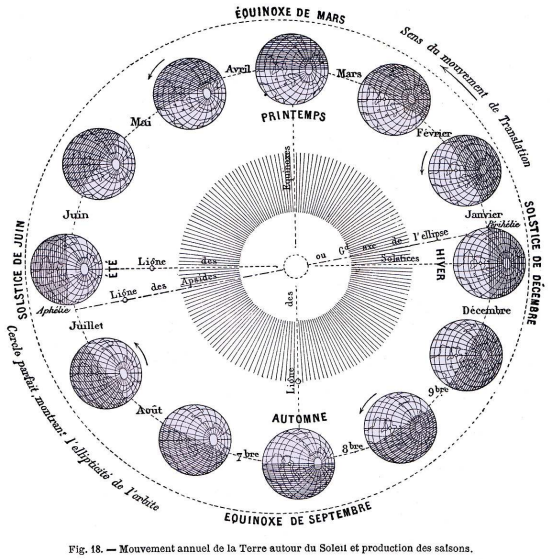


Fig. 18. — Mouvement annuel de la Terre autour du Soleil et production des saisons.

Fig.2. *Le mouvement de la Terre autour du Soleil, vue « de dessus ». Figure extraite de l'*Astronomie Populaire *de Camille Flammarion.*

Première loi : les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers. Le Soleil n'est donc pas au centre de l'ellipse. La position de la Terre la plus proche du Soleil au cours de l'année s'appelle le périhélie et la position de la Terre la plus lointaine l'aphélie. Il n'y a aucune relation entre périhélie et aphélie (dépendant de la forme de la trajectoire de la Terre) et solstices et équinoxes (dépendant de l'inclinaison de la Terre). Ajoutons que toutes ces données physiques varient avec le temps. La plus importante variation de l'orientation de l'axe de la Terre correspond à la précession des équinoxes et la variation du périhélie correspond à l'avancée du périhélie. Actuellement le périhélie a lieu à une date située entre le 2 et le 5 janvier et l'aphélie entre le 3 et le 7 juillet environ. La variation de cette date d'une année à une autre dépend des variations de notre calendrier, de la position de la Lune par rapport à la Terre, et d'autres variations comme la précession des équinoxes. Ainsi la Terre est au plus près du Soleil lorsque c'est l'hiver dans notre hémisphère. Ce résultat peut sembler paradoxal, et c'est un paradoxe de plus, mais il démontre bien que les saisons ne sont pas dues aux variations de distance de la Terre au Soleil au cours de l'année.
Ceci est expliqué par la deuxième loi de Kepler : les rayons vecteurs des planètes décrivent des aires égales en des temps égaux. Cette loi est représentée sur la figure 3. Ceci signifie que lorsque la Terre est plus près du Soleil, elle va plus vite sur sa trajectoire. Le périhélie étant proche du solstice de décembre, on en déduit que la Terre est plus rapide sur sa trajectoire entre l'équinoxe de septembre et l'équinoxe de mars qu'entre l'équinoxe de mars et l'équinoxe de septembre et voilà pourquoi les saisons automne et hiver (de l'hémisphère nord) sont plus courtes que les saisons printemps et été.

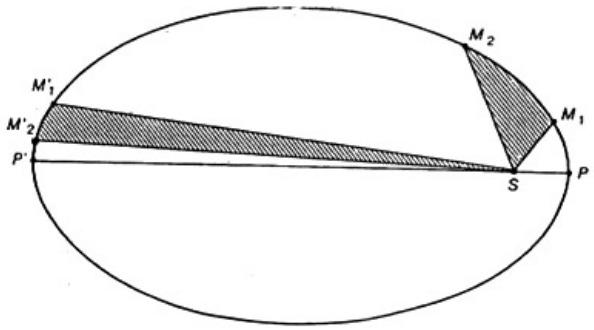


Fig.3. *Deuxième loi de Kepler, dite loi des aires : le rayon vecteur balaie des aires égales en des temps égaux. Quand l'astre, ici la Terre, s'éloigne du Soleil, sa vitesse diminue.*

Mouvement de la Lune dans le ciel

Pour étudier le mouvement de la Lune, on commence par regarder les petites figurines qui figurent dans la partie calendrier. Attention ! Ces petites figurines peuvent être parfois difficilement lisibles, et dans certains calendriers (autres que ceux de la Poste), il peut même exister des erreurs.

On voit que ces figurines sont toujours disposées dans le même ordre : 1/ une Lune ronde et noire, 2/ un croissant dont les cornes sont orientées vers la gauche et la rotondité vers la droite, 3/ une Lune ronde et claire, et 4/ un croissant dont les cornes sont toujours orientées vers la droite et la rotondité vers la gauche. Ensuite le cycle recommence. On peut constater qu'entre deux de ces petites figures, il s'écoule 7 ou 8 jours, et qu'avant que l'on ne retrouve la même figure, il s'écoule presque un mois.

Allons maintenant sur la page à l'intérieur du calendrier "Levers et couchers du Soleil et de la Lune", on regarde maintenant les colonnes du tableau correspondant aux levers et couchers de la Lune. On remarque d'abord que d'un jour à l'autre, la Lune se lève et se couche de plus en plus tard, et ceci quel que soit le moment de l'année. Ce retard d'un jour à l'autre est très variable et la valeur moyenne est environ une heure. C'est la raison pour laquelle la marée accuse généralement un retard d'environ une heure par jour, puisqu'elle est provoquée principalement par la Lune.

Dans ce tableau, on recherche un jour où la Lune et le Soleil se lèvent et se couchent en même temps. Il y a de nombreuses possibilités : en effet, un tel cas se produit environ tous les mois, en fait douze ou treize fois par an. En se rapportant aux phases de la Lune données sur le côté de la même page, on voit qu'un tel jour correspond à la Nouvelle Lune. Le Soleil et la Lune se levant et se couchant en même temps, la Lune est dans le ciel uniquement pendant la journée. On ne la voit pas parce que seule la partie non éclairée nous fait face. Dans les jours très proches de la Nouvelle Lune, on ne verra le fin croissant que lorsqu'il fait nuit, au début ou à la fin de la nuit, à cause de la trop grande clarté du Soleil pendant la journée.

De la même façon, on recherche un jour où la Lune se lève quand le Soleil se couche, et se couche quand le Soleil se lève, et on voit que ce jour est celui de la Pleine Lune. Dès que le Soleil est descendu sous l'horizon du côté de l'ouest, la Pleine Lune se lève juste du côté opposé. C'est un spectacle vraiment beau quand on a l'occasion de le voir dans un endroit dégagé, en mer ou sur une plaine. La longueur de l'intervalle de temps pendant lequel la Pleine Lune est visible dans le ciel, c'est-à-dire le temps compris entre le lever de Lune et le coucher de Lune une nuit de Pleine Lune, correspond donc à la longueur de la nuit. Cet intervalle de temps sera long au solstice d'hiver puisque c'est le moment de la nuit la plus longue de l'année. La pleine Lune aura alors le temps de monter haut dans le ciel au cours de son parcours. Le point le plus haut de la pleine Lune se produit en première approximation, à minuit, temps universel, c'est à dire approximativement à 1 h du matin en hiver et 2 h du matin en été.

Au solstice d'été, jour qui correspond à la plus longue journée et à la nuit la plus courte, l'intervalle de temps pendant lequel la Pleine Lune sera visible dans le ciel, c'est à dire la longueur de la nuit, sera court : la pleine Lune ne sera jamais très haut dans le ciel au cours de cette nuit. Pendant les équinoxes, la Pleine Lune est visible dans le ciel pendant 12 h, en première approximation.

Attention ! Tout ce qui est dit ci-dessus n'est valable que pour la Pleine Lune.

Il faut noter que les figures données dans nos calendriers sont valables pour l'hémisphère nord et ce sera le seul cas traité ici. Cependant, on peut trouver à l'île de la Réunion, par exemple, un calendrier publicitaire présentant les dessins de la Lune comme si la Réunion était dans l'hémisphère nord !

On étudie maintenant des moments du cycle lunaire qui ne sont ni la Pleine Lune ni la Nouvelle Lune.

À partir des heures de lever et de coucher de Lune et de Soleil, on détermine les moments de la nuit où la Lune est visible, c'est à dire les moments situés entre le lever et le coucher de la Lune et entre le coucher et le lever du Soleil (ce dernier point est surtout valable pour les moments où le croissant est mince, à une date proche de la Nouvelle Lune). On détermine s'il s'agit du soir, début de la nuit, ou du matin, fin de la nuit. Maintenant à partir des petits dessins de Lune sur la partie « calendrier » on détermine à quel moment du cycle lunaire la Lune est visible le soir, et quel est alors son aspect, et à quel moment de son cycle la Lune est visible le matin et de même quel est alors son aspect.

On voit que la Lune du soir correspond au premier quartier, la partie arrondie du croissant de Lune se présentant alors vers la droite, et les "cornes" vers la gauche. En effet, dans l'hémisphère nord, la Lune ainsi que le Soleil, depuis leur lever jusqu'à leur coucher,

passent de l'est au sud, puis à l'ouest, et cela à cause du sens de la rotation de la Terre sur elle-même. Nous observons donc leur déplacement dans le ciel de la gauche vers la droite. Au début de son cycle, quand la Lune est un peu en retard sur le Soleil, elle suivra la même trajectoire, mais en suivant le Soleil. Elle sera donc "à gauche" du Soleil. La partie arrondie qui correspond à la partie éclairée, sera du côté du Soleil, c'est-à-dire vers la droite et les cornes nous apparaîtront tournées vers la gauche. Dans les premiers jours de son cycle, la Lune est peu éclairée et ne sera visible que le soir après la tombée de la nuit. Comme elle suit le Soleil de peu, elle ne tardera pas à se coucher peu de temps après lui et ne sera donc plus visible dans la suite de la nuit. Ceci est illustré par la figure 4.

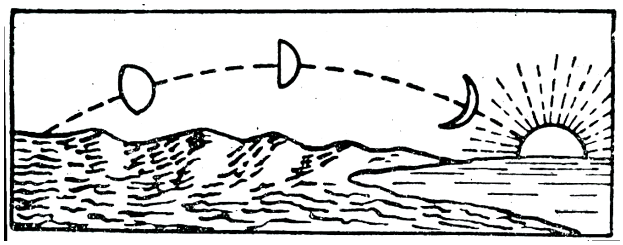


Fig.4. *Différents aspects de la Lune et sa position par rapport au Soleil. Figure extraite de l'*Astronomie Récréative *de I. Perelman.*

De la même façon, une Lune visible dans la deuxième partie de la nuit correspond à la deuxième partie du cycle lunaire et présentera sa partie arrondie vers la gauche. En effet, dans les derniers jours du cycle, les levers et couchers de Lune précèdent de peu les levers et couchers du Soleil. La Lune peu éclairée ne sera visible qu'avant le lever du Soleil, c'est-à-dire le matin. Elle sera donc à "droite" du Soleil et sa partie éclairée par le Soleil sera donc à gauche, et les cornes seront tournées vers la droite.

Rappelons brièvement deux moyens mnémotechniques pour identifier une Lune croissante et une Lune décroissante. Le moyen classique, ancien, dit qu'une Lune en forme de D (lettre majuscule) correspond à une Lune Croissante (en latin Crescens) et qu'une Lune en forme de C (lettre majuscule) correspond à une Lune Décroissante (en latin Decrescens). On en conclut que la Lune est menteuse, et comme le cycle de la Lune s'apparente plus ou moins au cycle des femmes, les femmes sont menteuses ! Bien évidemment, aucune femme n'est d'accord avec cette interprétation, qui de plus laisserait entendre que les femmes de l'hémisphère sud ne sont pas menteuses puisque la forme de la Lune y est inverse de celle de l'hémisphère nord. On parlera donc préférentiellement du moyen mnémotechnique plus moderne dans lequel on trace un trait vertical qui rejoint les cornes du croissant. On prolonge ce trait vers le bas quand c'est une Lune croissante : on obtient ainsi un « p » (lettre minuscule) pour Premier quartier ; on prolonge ce trait vers le haut quand c'est une Lune décroissante, et on obtient un « d » (lettre minuscule) pour Dernier quartier. Puisque l'on en est aux remarques et digressions pittoresques, remarquons que l'on dit toujours un croissant de Lune, même quand il s'agit d'une Lune décroissante, ce qui est légèrement contradictoire. Remarquons aussi que la pâtisserie appelée croissant est actuellement le plus souvent de forme allongée et n'est plus que très rarement en forme de croissant de Lune.

Trop souvent, les images représentent un paysage du soir, éclairé par un croissant de Lune en forme de C majuscule, comme s'il s'agissait d'une Lune en fin de cycle, visible seulement le matin (dans l'hémisphère nord !). On recherchera des représentations de la Lune sur des images ou des tableaux et on étudiera si cette représentation est correcte. Un tel exemple est donné figure 5. En fait, nous voyons plus fréquemment la Lune du soir, parce que au moment de la Lune du matin nous sommes le plus souvent endormis ou au moins dans nos maisons. Cependant, l'image réelle de la Lune du soir n'est pas évidente pour beaucoup d'entre nous.

Fig. 33. Une erreur astronomique a été faite par le peintre qui avait dessiné ce paysage. Laquelle ?

Fig.5. *Image servant de démonstration aux erreurs faites fréquemment par les peintres et dessinateurs qui représentent la Lune. Figure extraite de l'Astronomie Récréative de I. Perelman.*

On notera aussi que dans certaines représentations de la Lune, on voit des étoiles entre les "cornes" de la Lune, ce qui ne serait possible que si la Lune était transparente, ou s'il existait des étoiles situées entre la Lune et la Terre et, bien entendu, ces deux hypothèses sont absurdes ! On peut inciter les élèves à rechercher des images ou des tableaux sur lesquels la Lune figure et déterminer si ces images correspondent à la réalité.

■

ARTICLE DE FOND

La nature énigmatique du temps

et les progrès dans la précision de sa mesure

Christian Larcher, Paris

Comment le temps est à la fois une grandeur dont la nature profonde est indéfinissable et cependant celle qui se mesure avec une précision bien supérieure à toutes les autres unités fondamentales.

Le temps c'est quoi ?

Qu'il a-t-il de plus commun que la notion de temps ? Lorsque l'on parle du temps tout le monde comprend facilement de quoi il s'agit, mais de manière étonnante, malgré de très nombreuses tentatives, le concept reste indéfinissable. On parle du temps comme on parle d'une substance quelconque. Mais le temps, qui l'a vu ? Qui l'a senti, entendu ou touché ? Aucun organe ne permet de le percevoir et de surcroît il apparaît le plus souvent comme ce qui manque ou quelque chose qui presque toujours est en train de disparaître. Par ailleurs, comme le remarque Etienne Klein, le temps désigne mille choses différentes ; il est doué d'une « polysémie fulgurante » puisqu'il peut selon les cas désigner : la succession, la simultanéité, la durée, le changement, le devenir, l'urgence, l'attente, l'usure, la vitesse, le vieillissement, les révolutions géologiques et même l'argent ou la mort.

Tout le monde parle du temps qui passe de plus en plus vite ! Mais le temps a bon dos ; on préfère considérer qu'il passe, comme on dit dans un train que le paysage défile par la fenêtre, alors que c'est nous qui passons et non le paysage. Le temps ne passe pas, il est éternellement là, à faire passer la réalité. Jacques Prévert le dit admirablement : *« Le temps dont on dit qu'il passe, alors qu'il s'assoit et reste là à vous regarder passer »*.

On se demande si le temps est en dehors de nous ou en nous. Est-ce que nous possédons le temps ou est-ce lui qui nous possède ?

Quelques essais de définition

Pour Pascal, le mot temps est un mot primitif donc indéfinissable. Il est déjà là de toute éternité…

« Le temps…Qui pourra le définir ? Et pourquoi l'entreprendre, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant de temps, sans qu'on le désigne davantage ».

Pour Kant, c'est un produit de la conscience ; il n'a pas d'existence *« en dehors de l'esprit, il fait partie de la structure de l'esprit »*.

Pour Luis Borges : *« Le temps est la substance dont je suis fait. Le temps est un fleuve qui m'entraîne, mais je suis le temps ; c'est un tigre qui me déchire mais je suis le tigre ; c'est un feu qui me dévore mais je suis le feu.*

Allons voir dans le dictionnaire les diverses définitions :

Petit Robert : *« milieu **indéfini** où paraissent se dérouler irréversiblement les existences dans leur changement, les événements et les phénomènes dans leur succession »*. Cette définition choisit de considérer le temps comme un cadre dans lequel tous les événements se déroulent.

Hachette *: « celle des dimensions de l'Univers selon laquelle **semble s'ordonner** la succession irréversible des phénomènes »*.

Comment mesure-t-on le temps ?

Mesurer une grandeur physique, c'est la comparer à une autre grandeur de même espèce choisie conventionnellement pour unité. Supposons que nous voulions mesurer une longueur avec un mètre gradué en centimètres. On fait coïncider le zéro de la règle avec une extrémité de la longueur à mesurer puis l'on cherche à quelle graduation correspond son extrémité. Si la règle est graduée en centimètres, il est probable que l'on trouvera une valeur comprise entre deux graduations et la mesure sera peu précise. Si le nombre de subdivisions augmente on peut obtenir une meilleure précision, mais il arrive un moment où la mesure devient impossible car les divisions ne sont plus lisibles.

Mesurer le temps ?

En réalité on ne mesure pas « le temps » mais seulement des durées, c'est-à-dire des intervalles de temps. Concrètement on choisit un phénomène linéaire dont l'un des paramètres varie proportionnellement au temps « qui s'écoule ». Initialement on utilisait des clepsydres, des sabliers, des bougies ou des lampes à huile. Pour des temps longs on mesure l'angle de rotation de la Terre repéré à l'aide du mouvement apparent des étoiles. Pour « garder le temps » on utilise depuis 1657 et grâce aux travaux de Huygens (1629 – 1695) des horloges mécaniques utilisant un pendule simple. Plus tard apparurent les

horloges à quartz et maintenant des horloges atomiques, extrêmement précises.
Mais il importe de remarquer que le temps n'est pas dans l'horloge, « le temps loge hors de l'horloge ». Une horloge ne fabrique pas de temps, elle ne fait que reproduire un mouvement régulier qu'il s'agit ensuite de comptabiliser. En définitive l'horloge se comporte comme l'association d'un métronome et d'un compteur. La mesure des durées précises de temps nécessite l'utilisation d'un phénomène répétitif très régulier et parfaitement reproductible. La mesure sera d'autant plus précise que la période du phénomène répétitif (la base de temps) sera plus petite ou, ce qui revient au même, que sa fréquence sera plus grande. Plus on compte un nombre élevé de graduations temporelles meilleure sera la précision.

L'apport historique de Galilée (1564 – 1642)

Nous devons à Galilée l'introduction du temps comme paramètre essentiel de la physique. C'est aussi Galilée qui comprit la nécessité de distinguer le concept de temps **des phénomènes qui se produisent dans le temps**. Le père de Galilée voulait que son fils entreprenne des études de médecine. Se conformant aux vœux de son père, il commença de telles études. Mais ce n'est pas la médecine qui l'intéressait vraiment et il abandonna au bout de quelques années sans obtenir de diplôme.

Mais peut-être ces études furent-elles à l'origine de l'idée de fabriquer, dés 1586, un pulsomètre. Il s'agit d'un appareil de mesure du pouls d'un malade à partir du nombre de battements d'un pendule de longueur fixe. À l'époque on déterminait le pouls des malades en utilisant un pendule de longueur variable (masse coulissante). La longueur du fil était choisie de façon que la fréquence de battement du pendule soit la même que la fréquence cardiaque. Par exemple, un homme dont le battement cardiaque est de soixante pulsations par minute (soit 1 battement par seconde) est équivalent à un pendule dont la longueur correspond à environ un mètre actuel (chaque période est constituée de 2 battements, un aller et un retour, la période de ce pendule est donc $T_1 = 2$ secondes). Si le rythme des battements cardiaques vaut le double (2 battements par seconde soit 120 battements par minute, soit ($T_2 = 1$s) il faudrait utiliser un pendule quatre fois plus court soit 0,25 m. En effet d'après la loi sur les pendules simples établie plus tard en 1632 par Galilée, la période d'un pendule est donnée par la relation : $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, l étant la longueur du pendule et g l'accélération de la pesanteur.

Pour deux pendules simples de longueurs l_1 et l_2 on aura donc $T_1/T_2 = \sqrt{l_1/l_2}$ ce qui, avec $T_1 = 2$ s et $T_2 = 1$ s pour $l_1 = 1$ m, donne $l_2 = ¼$ m.

La légende raconte que le jeune Galilée, qui s'ennuyait durant les offices dans la cathédrale de Pise, aurait observé que les lampadaires qui oscillaient dans l'air avec des amplitudes différentes avaient cependant des périodes égales (les chaînes de suspension avaient la même longueur). Pour effectuer ces mesures, il utilisait ses propres battements cardiaques (in dialogue 1632).
Mais finalement que mesure-t-on si le battement du cœur se mesure à l'aide d'un pendule et les oscillations des « lustres- pendules » à l'aide d'un battement cardiaque ? Où est le temps dans tout cela ? On est dans le cas du serpent qui se mord la queue, dans un cercle vicieux déjà perçu par Aristote qui **écrivait :** *« Nous ne mesurons pas seulement le mouvement par le temps mais aussi le temps par le mouvement »* Aristote (Physique livre IV ; *De l'espace, du vide et du temps* Ch. XVIII).

Les horloges atomiques

La précision des horloges atomiques provient essentiellement de l'utilisation des « atomes froids ». Un atome froid est un atome que l'on a presque totalement immobilisé en abaissant sa température très près du zéro absolu (10^{-6} degré au-dessus du zéro absolu). Les atomes à la température ordinaire ont des vitesses de l'ordre de plusieurs centaines de mètres par seconde. Actuellement c'est l'atome de césium qui sert de référence à la définition de la durée d'une seconde. Une onde électromagnétique appropriée permet de faire passer l'atome de césium de son niveau d'énergie le plus bas à un niveau d'énergie immédiatement supérieur. Pour provoquer ce saut énergétique, il est nécessaire d'utiliser une onde de fréquence, extrêmement précise, dont la valeur est très grande, de l'ordre de 10 milliards d'hertz.
C'est le mouvement des atomes qui limite la précision. Cette limitation résulte de plusieurs facteurs mais le plus simple à comprendre concerne l'effet Doppler. L'effet Doppler a de nombreuses applications par exemple en médecine il permet de mesurer la vitesse du sang dans les veines ou les artères ; sur le réseau routier il est à la base de la détermination de la vitesse des automobiles. En astronomie, c'est par le même effet que l'on peut déceler la présence d'une exoplanète orbitant autour son étoile hôte. L'effet Doppler joue un rôle essentiel car lorsque l'atome de césium est en mouvement, il n'absorbe pas ou n'émet pas d'ondes électromagnétiques **exactement à la même fréquence** que s'il était au repos. Lorsque les atomes sont quasiment immobiles il n'y a plus d'effet Doppler et la précision devient très grande. Or cette précision est indispensable dans les techniques modernes (GPS, télécommunications etc.).
La très grande précision des horloges atomiques résulte du fait qu'à des températures très proches du zéro absolu on ne peut plus considérer les atomes comme des petits grains de matière mais comme des

ondes. Il s'agit des ondes associées à chaque particule par la relation de Louis de Broglie : $\lambda = h/mv$. Ces ondes ne sont pas habituellement utilisables car les longueurs d'onde concernées sont trop grandes par rapport à la distance entre les atomes mais avec les atomes froids la vitesse des atomes étant très faible, les ondes de de Broglie associées sont dans le domaine micro-onde. Avec ces micro-ondes on peut réaliser des mesures interférométriques très précises. En définitive, les horloges atomiques sont de fait des « interféromètres atomiques » ce qui permet d'atteindre des précisions très élevées. Depuis ces 50 dernières années, la précision des horloges a augmenté d'un facteur 10 tous les 10 à 12 ans. Dans l'avenir, on devrait pouvoir construire des horloges à fréquences optiques (10^{15} hertz). La précision augmente également avec la durée des mesures. Plus cette durée est importante plus la précision est élevée. Dans le projet PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite) il est prévu d'envoyer une horloge atomique à césium dans l'espace en l'arrimant à la station spatiale ISS. En microgravité les atomes, déjà ralentis par l'action de lasers, gardent plus longtemps leur vitesse initiale ce qui permet d'augmenter la qualité des mesures et donc d'améliorer encore les performances de l'horloge.

Actuellement on cherche à utiliser d'autres atomes que le césium. Le 22 août 2013, les Américains ont annoncé avoir construit une horloge expérimentale à ytterbium augmentant ainsi d'un nouveau facteur 100 la précision. Avec cette horloge la précision est de l'ordre de 10^{-18} ; cette valeur en soi n'est pas très « parlante » mais si l'on remarque que 10^{18} secondes correspondent approximativement à l'âge de l'Univers, cela signifierait qu'une telle horloge, mise en fonctionnement à l'époque supposée du big-bang, accuserait un décalage de nos jours de l'ordre de la seconde. Un résultat qui nous laisse pour le moins rêveur…

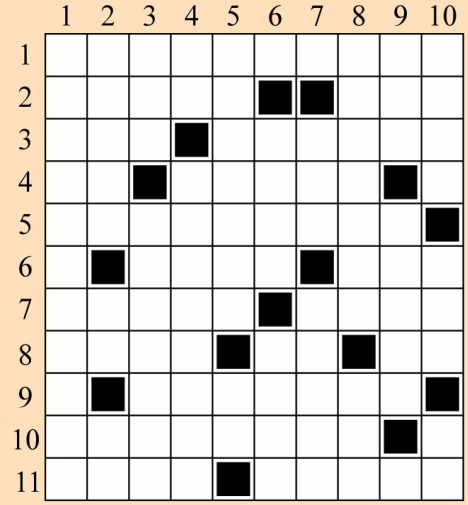
Webographie

Pharao (CNES + LKB et SYRTE) : http://smsc.cnes.fr/PHARAO/Fr/
http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/6115-communiques-de-presse.php?item=8859
Une horloge 100 fois plus précise que l'horloge au césium :
http://www.enerzine.com/2/16146+une-horloge-atomique-100-fois-plus-precise-que-celle-au-cesium+.html
L'horloge la plus précise du monde :
http://www.lemonde.fr/sciences/article/2013/08/23/l-horloge-la-plus-precise-au-monde-devoilee_3465319_1650684.html ■

Mots croisés, le temps

Horizontalement

1. Elles ont longtemps mesuré le temps.
2. Unité de temps. Pour elle, l'unité astronomique de temps est le jour, défini comme égal à 86 400 s.
3. Salut. Il permet de définir la seconde.
4. 440 Hz. Photon par exemple.
5. Le temps est la quatrième.
6. L'origine du zéro. Sans effets.
7. Mayennaise. On y a une conception plus cyclique du temps.
8. 32400 s en h. Elle a aussi servi de repère de temps. Code temporel.
9. Soixantièmes de seconde.
10. Inégalité lunaire.
11. Placée. Il peut faire l'union.



Verticalement

1. Comme les origines de nos unités de temps.
2. Gonflai. 293,66 Hz. En bas d'une horloge.
3. Attrapée. Unités de temps.
4. En principe. Celui de l'heure d'été est contesté.
5. Unité de temps. Conjonction.
6. Croc de boucher. But.
7. Personnel. Elle côtoie Mizar.
8. Démolissons. Elle forme nos dirigeants.
9. Fait fonctionner le 1 horizontal. On les a longtemps partagées en douze.
10. Jeu. Une mauvaise abréviation de temps. Le temps pour tous.

Réponses page 40

AVEC NOS ÉLÈVES

L'affaire de la Sainte-Luce

Francis Berthomieu, Montfort sur Argens

L'équation du temps est un sujet délicat, qui fait appel à des notions mathématiques multiples et souvent difficiles. Ce bref article n'a pas la prétention d'entrer dans les détails théoriques, mais de faire visualiser les facteurs qui font qu'il n'est jamais midi … à midi !

Une question en appelle une autre…

Il est fréquent, en décembre, de se trouver confronté au fameux dicton : « À la Sainte-Luce, les jours s'allongent d'un saut de puce ». Le sujet pose en effet problème ; le calendrier des postes est formel : la Sainte-Luce (en fait on fête sainte Lucie de Syracuse) se célèbre le 13 décembre ! On vous demande alors : « Comment les jours peuvent-ils s'allonger dès le 13 décembre alors qu'ils sont censés raccourcir jusqu'au jour du solstice ? »

Il est pratique de donner la réponse « savante ». On explique que les dates en usage de nos jours sont celles du calendrier grégorien, alors que le dicton se base sur celles du calendrier julien. C'est une occasion de préciser que le décalage entre les deux calendriers était de 10 jours, et que donc, jadis, la Sainte-Luce se célébrait à la date du solstice. C'est ne pas compter avec l'esprit d'observation de notre interlocuteur. Il affirme en effet avoir bien observé qu'à partir du 13 décembre, le Soleil, après s'être régulièrement couché de plus en plus tôt, reprend ses aises le soir et « rallonge » les jours de quelques (*très*) *petites* minutes… Il vous apporte même un relevé officiel de l'IMCCE[1] établi pour Paris (2013).

Soleil

Lieu : Paris, Paris, FR
02°21'08" E / 48°51'24" N

Date Temps Universel	Coucher heure	azimut
2013-12-01	15:54:42	236°19'
2013-12-02	15:54:12	236°04'
2013-12-03	15:53:46	235°50'
2013-12-04	15:53:22	235°36'
2013-12-05	15:53:02	235°23'
2013-12-06	15:52:45	235°11'
2013-12-07	15:52:30	234°59'
2013-12-08	15:52:19	234°49'
2013-12-09	15:52:10	234°39'
2013-12-10	15:52:05	234°30'
2013-12-11	15:52:03	234°21'
2013-12-12	15:52:03	234°14'
2013-12-13	15:52:07	234°07'
2013-12-14	15:52:14	234°01'
2013-12-15	15:52:24	233°55'
2013-12-16	15:52:37	233°51'
2013-12-17	15:52:53	233°47'
2013-12-18	15:53:12	233°44'
2013-12-19	15:53:34	233°42'
2013-12-20	15:53:59	233°41'
2013-12-21	15:54:28	233°40'
2013-12-22	15:54:59	233°41'
2013-12-23	15:55:33	233°42'
2013-12-24	15:56:10	233°44'

On y vérifie bien qu'à partir du 13 décembre le coucher du Soleil se produit bien chaque jour… quelques ***secondes*** plus tard, et que le dicton semble dire vrai !

Il faut alors regarder plus complètement cette table :

Soleil

Lieu : Paris, Paris, FR
02°21'08" E / 48°51'24" N

Date Temps Universel	Lever heure	Passage au méridien heure	Passage au méridien hauteur	Coucher heure
2013-12-13	07:37:27	11:44:51	+17°58'	15:52:07
2013-12-14	07:38:18	11:45:20	+17°55'	15:52:14
2013-12-15	07:39:07	11:45:48	+17°51'	15:52:24
2013-12-16	07:39:53	11:46:17	+17°49'	15:52:37
2013-12-17	07:40:36	11:46:47	+17°47'	15:52:53
2013-12-18	07:41:16	11:47:16	+17°45'	15:53:12
2013-12-19	07:41:54	11:47:45	+17°44'	15:53:34
2013-12-20	07:42:29	11:48:15	+17°43'	15:53:59
2013-12-21	07:43:02	11:48:45	+17°42'	15:54:28
2013-12-22	07:43:31	11:49:15	+17°42'	15:54:59
2013-12-23	07:43:58	11:49:44	+17°43'	15:55:33
2013-12-24	07:44:22	11:50:14	+17°44'	15:56:10

Et en calculant la durée du jour (entre lever et coucher du Soleil), les choses semblent rentrer dans l'ordre !

date	coucher	lever	Durée du jour
13/12/2013	15:52:07	07:37:27	08:14:40
17/12/2013	15:52:53	07:40:36	08:12:17
21/12/2013	15:54:28	07:43:02	08:11:26
24/12/2013	15:56:10	07:44:22	08:11:48

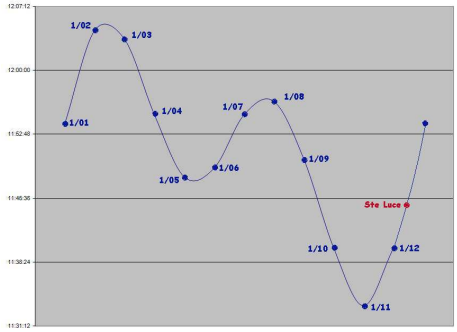
Les jours continuent donc bien à « raccourcir » jusqu'au 21 décembre, même si le Soleil se couche effectivement chaque jour un peu plus tard ! Où chercher la faille ? Dans l'heure du *lever* de Soleil ! S'il se lève chaque jour plus tard que la veille, et que ce « retard au lever » est supérieur au « retard au coucher » la durée du jour peut en effet continuer à diminuer !

C'est là que notre interlocuteur sagace va poser un autre problème, bien plus sérieux que la date de la Sainte-Luce… Ces « retards », à la fois au *lever* et au *coucher* doivent s'accompagner d'un « retard » *tout au long de la journée* … et il doit donc être midi chaque jour un peu plus tard que la veille ! Ce que confirme l'examen de la colonne donnant l'heure de passage du Soleil au méridien (il est alors « midi solaire ») : Tout au long du mois de décembre, on voit qu'il est « midi solaire » tous les jours un peu plus tard, et pas du tout à « midi de la montre », ni même à midi en Temps Universel ! (Nous admettrons que notre ami sait qu'il y a, en hiver, une heure de décalage entre l'heure de sa montre et l'heure en Temps Universel. Il est donc prêt à admettre qu'à Paris, le 21 décembre 2013, il était « midi solaire » à 12 h 48 min 45 s de la montre). Et l'on répond alors qu'il va falloir parler de « l'équation du temps »… Aïe, notre interlocuteur a tendance à perdre pied … Aidons-le !

[1] Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides.

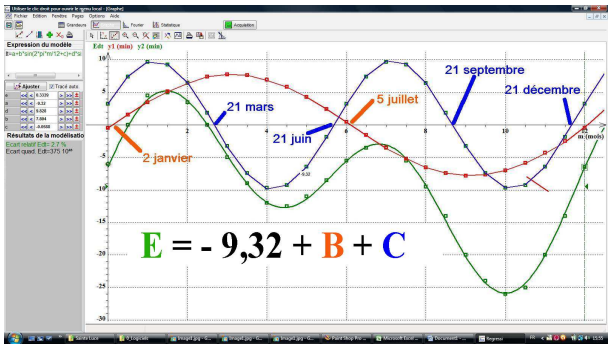
À quoi sert un modèle ?

Le jour de la Sainte-Luce, il est donc « midi solaire » à 11 h 44 min 51 s : cela signifie que le Soleil est alors en avance de 15 min et 9 s sur le Temps Universel ! Qu'en est-il tout au long de l'année ? Calculons l'écart temporel E entre midi solaire vrai (11:44:51) et midi TU (12:00:00). Ce calcul (algébrique) donne une valeur négative (même si c'est une avance !) pour la date de la Sainte-Luce (- 15 min 9 s) et peut être répété pour tous les jours de l'année. Il est alors aisé de visualiser l'évolution de cet écart en traçant le graphe de E en fonction de la date.



Les physiciens ont coutume de chercher des fonctions mathématiques qui modélisent leurs graphiques. Des logiciels spécialisés[2] font cela fort bien : ici, on peut trouver que cette courbe peut être très bien représentée par la somme de trois termes :

- Une constante : A = - 9,32 min ;
- Une fonction sinusoïdale B de période 1 an ;
- Une fonction sinusoïdale C de période 6 mois.



La constante A est négative : elle représente la moyenne sur l'année des écarts entre l'heure (T.U.) et l'heure solaire (à Paris). Cette « avance » du Soleil sur le Temps Universel est assez facile à expliquer : dans son périple apparent d'est en ouest, le Soleil passe au-dessus du méridien de Paris un peu avant de passer au-dessus de celui de Greenwich. Il est facile de vérifier : la longitude de Paris est $\lambda = 2° 20'$ soit 2,33°. Le Soleil met 24 h (soit 1 440 min) pour parcourir 360°. Pour parcourir ces 2,33° il mettra : 2,33 × 1440 /360 = 9,32 min. CQFD ! Ce terme constant est donc lié au lieu géographique des observations.

La fonction sinusoïdale B, de période 1 an, s'annule au début des mois de janvier et de juillet. Ces dates coïncident avec deux positions remarquables de la Terre sur son orbite annuelle autour du Soleil : le périhélie (pour 2013, c'est le 2 janvier) et l'aphélie (le 5 juillet). Une explication liée au mouvement de la Terre sur son orbite sera privilégiée. Ce terme B est appelé *« équation du centre »*.

La fonction sinusoïdale C, de période 6 mois, s'annule donc quatre fois au cours de l'année. Un regard attentif situe ces quatre dates à proximité immédiate de celles des équinoxes et des solstices. Une explication liée aux saisons sera ici privilégiée. Ce terme C est appelé *« réduction à l'équateur »*.

Le terme constant A étant lié à un méridien terrestre particulier, seuls les termes B et C seront conservés pour définir leur somme E appelée ***« équation[3] du temps »*** qui a une signification plus universelle à l'échelle de la Terre :

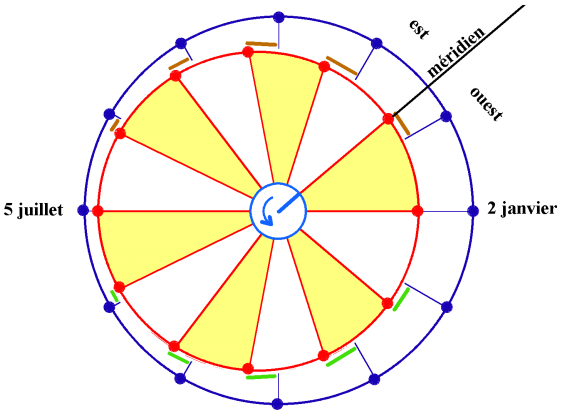
$$E = B + C$$

Des schémas pour comprendre

Comme souvent dans le domaine scientifique, il faut, pour simplifier, analyser séparément ces deux termes.

« L'équation du centre » B

On peut expliquer l'écart B (de période 1 an) en analysant le mouvement de la Terre autour du Soleil. Dans cette première partie, nous supposerons que l'axe de la Terre est perpendiculaire à l'écliptique (nous étudierons plus tard l'influence de l'obliquité de la Terre). Le mouvement obéit aux lois de Kepler, et en particulier à la loi des aires : ceci se traduit par une vitesse maximale de la Terre sur son orbite au périhélie (le 2 janvier en 2013) et minimale à l'aphélie (le 5 juillet). Dans un référentiel géocentrique, cela se traduit par un mouvement (apparent) du Soleil autour de la Terre (et sur le fond des constellations), et par un décalage entre sa position réelle et celle qu'aurait un Soleil avançant à vitesse angulaire constante et appelé Soleil moyen. La figure qui suit montre en bleu 12 positions successives du Soleil moyen (à intervalles de temps réguliers d'environ un mois) et en rouge les positions du Soleil réel aux mêmes dates. Pour mieux visualiser le phénomène, l'excentricité a été fortement exagérée.



[2] En l'occurrence le logiciel REGRESSI.

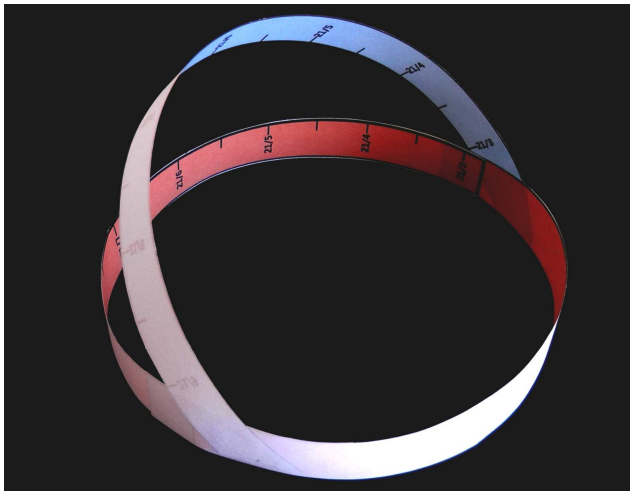
[3] En astronomie ancienne, le terme *équation* désignait une correction ajoutée algébriquement à une valeur moyenne pour obtenir une valeur vraie. Rien à voir avec l'acception moderne du terme *équation* !

On y voit les coïncidences des deux « Soleils » lors des passages aux extrémités du grand axe de l'ellipse, mais surtout les décalages (notés en brun de janvier à juillet et en vert de juillet à janvier). En imaginant le mouvement diurne de la Terre (représentée au centre de la figure par un cercle bleu clair) on pourra comprendre par exemple qu'en février le Soleil vrai (rouge) passe au méridien d'un lieu donné avec un certain retard sur le Soleil moyen (bleu) : ce retard correspond au terme B (positif en février) de l'équation du temps E.

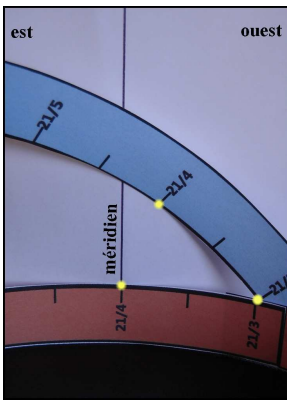
La « réduction à l'équateur » C

On peut maintenant expliquer l'écart « saisonnier » C en tenant compte (comme pour l'explication des saisons) de l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de l'écliptique. Comme une analyse de la situation en 3D s'impose, une maquette facilitera la compréhension.

Photocopiez et découpez les 3 bandes du bas de cette page. Assemblez bout à bout les deux bandes oranges pour constituer un cylindre (couleur et graduations côté intérieur), puis collez la bande bleue comme ci-dessous.

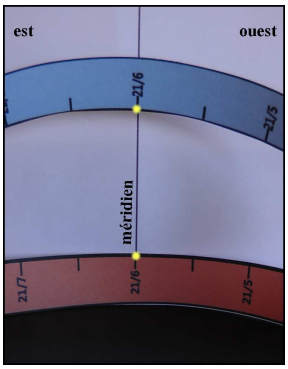


La bande orange représente l'équateur céleste et donne les positions du Soleil moyen au cours de l'année, à intervalles de temps réguliers d'un mois. La bande bleue représente l'écliptique (l'obliquité est légèrement exagérée) et les positions d'un Soleil qui le décrirait d'un mouvement uniforme (ses variations de vitesse ont été prises en compte dans le paragraphe précédent).
Les photos ci-après permettent de visualiser les écarts entre les passages au méridien de ces deux « Soleils ».

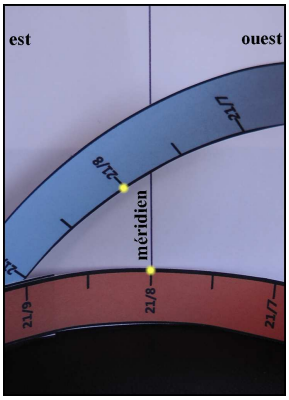


Ici, on voit qu'à l'équinoxe de printemps, vers le 21 mars, les deux points sont confondus.

Un mois plus tard, vers le 21 avril, lors du passage au méridien, le Soleil est décalé vers l'ouest (et donc en avance) par rapport au Soleil moyen.



Au solstice d'été, on constate que les deux points sont à nouveau confondus : ni avance, ni retard de l'un par rapport à l'autre lors du passage du méridien.

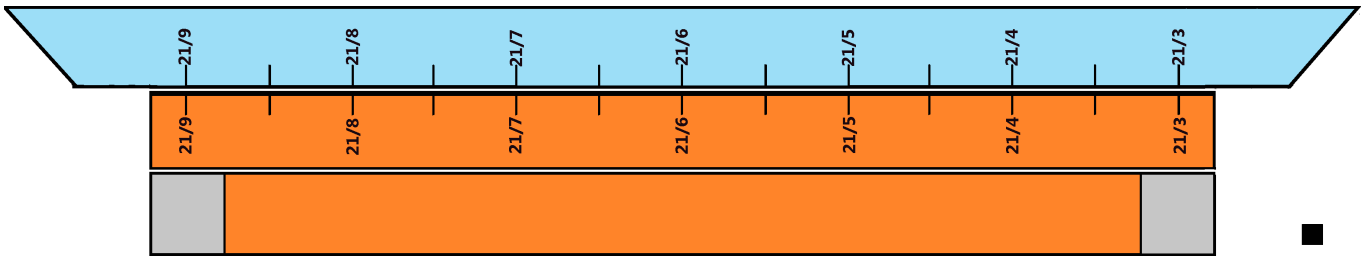


Et aux alentours du 21 août, c'est le Soleil qui est décalé vers l'est par rapport au Soleil moyen.

Il est donc en retard par rapport à lui lors du passage au méridien…

On verrait aussi une nouvelle coïncidence des deux points pour le solstice d'hiver, retrouvant bien les quatre dates pour lesquelles, en ne tenant compte que de l'obliquité, ce Soleil et le Soleil moyen seraient « synchrones ».

Gageons que les difficultés à interpréter ce qui se cache derrière le vocabulaire savant (équation du centre, réduction à l'équateur) pourront ainsi être surmontées et que le mystère de l'équation du temps aura trouvé une explication, au moins… visuelle !



ARTICLE DE FOND

Se dispenser du temps

Marc Lachièze-Rey, astroparticule et cosmologie, Paris Diderot

Cet article nous montre que pour parler de la relativité d'Einstein, une extrême rigueur est nécessaire dans le choix des termes utilisés. Des mots dont le sens est mal contrôlé peuvent véhiculer des représentations erronées et engendrer des situations apparemment paradoxales.

Souvent la physique einsteinienne – je veux dire par là les théories de la relativité restreinte et de la relativité générale – est présentée d'une manière timide, en tentant de préserver certains aspects de la vision newtonienne, notamment certaines notions à caractère temporel. L'intention est de décrire certains aspects d'une situation d'une manière conforme à notre intuition (qui correspond à peu près à la vision newtonienne). Mais cela conduit en général à des formulations alambiquées, à des acrobaties verbales qui finissent par ne plus avoir de sens, telles que « ralentissement du temps », « dilatations (ou contractions) des durées ». Ceci laisse souvent croire à un caractère paradoxal de ces théories, qui pourtant se distinguent au contraire par leur cohérence. Ce qui pose problème, et engendre d'apparents paradoxes, ce sont les tentatives de rendre compte de situations physiques avec un langage inadapté [1]: ici, de les interpréter comme si le temps existait alors que nous avons appris que cette notion est incompatible avec la réalité du monde.

La principale innovation de la physique einsteinienne consiste à intégrer dans ses fondements la disparition de la notion de temps. Je ne saurais, dans un bref article, en analyser tous les tenants et aboutissants, décrits ailleurs de manière plus complète[2]. Je présenterai ici, sans les justifier en détails, certaines des caractéristiques de cette disparition, dans le cadre de la relativité restreinte uniquement, sachant qu'une grande partie de ce qui sera écrit ici s'adapte très facilement à la relativité générale.

Événements, histoires

Physique newtonienne et physique einsteinienne partagent quelques notions fondamentales, d'ailleurs intuitives, celles d'*événements* et d'*histoires*.

Un *événement* se définit comme quelque chose qui se produit en un lieu précis et un instant, ou une date, précis (c'est en tout cas la définition de la physique newtonienne) : la rencontre entre deux particules dans l'accélérateur du CERN ; l'explosion d'une étoile ; une comète qui s'écrase sur Jupiter, mon 20^{e} anniversaire…

Une *histoire*, c'est un processus: une suite continue d'événements, en général vécue par un système physique : l'évolution d'une étoile de sa naissance à sa mort explosive ; la vie d'une particule de sa création à son annihilation ; ma tranche de vie entre mon 20^{e} et mon 30^{e} anniversaire … Une histoire est délimitée par un événement initial et un événement final.

Ces deux notions conservent leur validité aussi bien en physique newtonienne qu'en physique einsteinienne. Du point de vue géométrique, on associe un événement à un point de l'espace-temps, une histoire à un segment de courbe dans l'espace-temps qui relie un point--événement initial à un point--événement final. Ainsi par exemple, chaque événement de ma vie est un point ; ma vie elle-même est la succession continue de tous les événements que j'ai vécus de ma naissance à ma mort, qui dessine ma *ligne d'univers*. Il en est de même pour chaque objet physique, qui en fin de compte s'identifie à sa ligne d'univers.

Dates, durées, chronologie

Le temps absolu (dit « universel ») de la physique newtonienne se caractérise par deux propriétés essentielles *datation* et *durée* ; la première associe un nombre à tout événement ; sa date, exprimée en *temps universel*. La seconde associe un nombre à toute histoire: sa durée. En physique newtonienne, les deux notions sont bien définies et elles ont entre elles un lien fondamental ;

En physique newtonienne, la durée d'un processus est égale à la différence entre les dates de l'événement final et de l'événement initial.

La notion de temps (le temps « universel » ou « absolu » de Newton) synthétise ces deux notions (et d'autres, voir *Voyager dans le temps*, op. cit.).

[1] Une situation tout à fait analogue se présente en physique quantique, lorsque, par exemple, on tente d'interpréter la réalité en termes de corpuscules localisés.

[2] Voyager dans le temps: la physique moderne et la temporalité, Marc Lachièze-Rey, Seuil Sciences Ouvertes 2013.

Dans la physique einsteinienne (et en fait dans le monde réel), non seulement cet énoncé n'est pas vérifié, mais il n'a pas de sens.
En physique newtonienne toujours, chaque événement a une date : on peut la connaître ou non, mais elle existe au moins en principe. Cela définit un classement, une relation d'ordre entre tous les événements, appelé la *chronologie*: selon le classement de leurs dates :
A est chronologiquement antérieur à B : $A \leqslant B$;
ou bien,
B est chronologiquement antérieur à A : $B \leqslant A$.
Si les dates sont égales ($A \leqslant B$ et $B \leqslant A$), A et B sont simultanés.
La chronologie est une relation d'ordre *total* entre les événements[3] : pour A et B quelconques on a toujours $A \leqslant B$ ou $B \leqslant A$ (ou les deux).

Relativité restreinte

La caractéristique première des théories einsteiniennes, c'est l'impossibilité d'une datation objective, et par conséquent d'une chronologie objective. Précisons qu'il ne s'agit pas de l'impossibilité de *connaître* la date d'un événement, mais de l'impossibilité *de principe* de lui en associer une (du moins d'une manière objective).
Bien entendu, rien ne m'empêche d'associer plus ou moins arbitrairement un nombre à chaque événement ; à la limite, je puis le faire au hasard ; ou, pour être un peu moins fantaisiste, en suivant quelques règles « de bon sens » et définir une sorte de « datation personnelle », et donc de « chronologie personnelle ». Notre temps universel (TU) correspond exactement à un choix (raisonné) de ce type (voir ci-dessous). Il en existe beaucoup d'autres. Un tel choix effectué (celui du TU ou tout autre), je puis l'utiliser pour classer les événements ; mais ce classement n'aura aucune portée objective et aucune signification physique ; pas davantage que si j'associais à chaque événement une étiquette porteuse d'un nom arbitraire.

En effet, mon voisin peut choisir tout aussi légitimement « sa » datation en appliquant les mêmes critères que j'ai appliqués. Elle sera différente. En appliquant les mêmes procédures, il établira sa chronologie personnelle. Nous serons en désaccord non seulement sur les dates des événements, mais sur leur ordre chronologique : pour moi, A s'est déroulé avant B ; pour lui B s'est déroulé avant A, tandis que pour un troisième, ils seront simultanés. Aucun n'a raison davantage qu'un autre et l'une des premières contributions d'Einstein fut de montrer qu'il est impossible de départager et d'établir une chronologie objective. Cette constatation fut pour lui le point de départ pour la construction de ses théories. Précisons tout de suite que le choix du TU est motivé par le fait qu'il permet un accord à une certaine famille d'observateurs --- en gros tous les habitants de la planète --- tant qu'ils ne demandent pas une grande précision. Du point de vue de la physique einsteinienne, ce choix apparaît comme une convention commode, pertinente pour notre usage personnel ; le terme « personnel » pouvant être étendu à l'humanité entière dès lors que l'on n'exige pas une trop grande précision (voir ci-dessous).

Durées propres

Au contraire, la notion de durée est parfaitement définie et opérationnelle en physique einsteinienne. On parle alors de *durée propre* : à toute histoire est associée sa durée propre. Elle est précisément calculable selon la théorie. Elle est parfaitement mesurable : c'est en fait la durée propre d'une histoire que l'on mesure le plus souvent lorsque l'on parle de mesure temporelle : entre deux tic-tacs de la montre, s'écoule par définition une seconde de durée propre de l'histoire de cette montre. Les secondes – auxquelles nous nous rapportons pour toute mesure de ce type – ne sont pas des unités de temps, mais des unités de durées propres.

Lorsque je parle de la durée des battements de mon cœur [4], de ma respiration, de ma digestion …, il s'agit en fait de durées propres; il en est de même pour mes processus mentaux tels que lecture, réflexion, calcul… ; il en est de même de ma sensation de l'écoulement du temps… Tout ceci se définit en termes des durées propres de portions de ma propre histoire. Ce sont bien ces durées propres que je ressens physiologiquement, que j'éprouve psychologiquement. Tout ceci de manière parfaitement ordinaire sans qu'il n'y ait jamais ni ralentissement, ni dilatation du temps ou quoi que ce soit que l'on puisse qualifier de la sorte.

La notion de durée propre est parfaitement définie et opérationnelle en physique einsteinienne, relativité restreinte comme relativité générale. Et c'est la seule notion à caractère temporel bien définie. Cependant une durée propre [le long de] de *mon*

[3] En physique newtonienne, l'ordre chronologique se confond avec l'ordre causal ; cela n'est plus vrai en physique einsteinienne (voir *Voyager dans le temps, op. cit.*).

[4] Ou inversement du *rythme* défini comme l'inverse de la durée moyenne entre deux battements.

histoire n'a aucune pertinence pour ce qui n'y participe pas directement. Je ne puis utiliser mes durées propres pour repérer les événements, ou les processus qui se déroulent sur la planète Mars ; ou, de manière générale, ailleurs que dans une position que j'occupe (ou que j'ai occupée). Le Martien ne peut pas davantage appliquer sa notion de durée propre à un processus terrestre.

Le point de la physique einsteinienne le plus déroutant, le plus difficile à assimiler (et pour certains, à admettre), c'est que les durées propres n'obéissent absolument pas à la propriété fondamentale énoncée plus haut : non seulement la durée propre d'une histoire n'est liée à aucune datation --- la notion n'existe pas de manière objective. --- mais elle ne dépend pas des seuls événements initial et final. Il est illustré par l'historiette des jumeaux proposée par Paul Langevin [5]. Elle est souvent qualifiée de « paradoxe » mais son caractère paradoxal ne surgit que lorsque l'on tente de l'analyser avec des notions inadaptées, celle de temps en particulier.

Jumeaux de Langevin

« Je n'ai développé ces spéculations que pour montrer par un exemple frappant à quelles conséquences éloignées des conceptions habituelles conduit la forme nouvelle des notions d'espace et de temps » Paul Langevin, L'évolution de l'espace et du temps

L'énoncé est simple. Les deux jumeaux Albert et Isaac fêtent ensemble, sur la planète Terre, leur 20e anniversaire commun. Albert part voyager dans l'espace, loin et vite ; tandis que Isaac reste sur Terre. Albert revient sur Terre après avoir vécu [une durée propre de] 10 ans. En fêtant son 30e anniversaire, il embrasse Isaac qui fête son 40e anniversaire.

Albert et Isaac ont vécu deux histoires différentes, qui débutent par le même événement, et qui finissent par le même événement. La durée propre de l'histoire d'Albert est de 10 ans. La durée propre de l'histoire d'Isaac est de 20 ans. Il faut comprendre qu'Albert a bien vécu 10 ans dans tous les sens du terme [6] : physique (c'est ce qu'a mesuré son horloge), physiologique (son cœur a battu 10 ans), intellectuel (il a pu lire le nombre de livres que l'on peut lire en 10 ans), psychologique (il a ressenti une durée de 10 ans). Et qu'Isaac a bien vécu 20 ans dans tous les sens du terme.

Il n'y a là ni « ralentissement » du temps, ni contraction (ou dilatation) d'une quelconque durée. Il y a deux durées propres, de deux histoires différentes.

Question parfois posée. Pourquoi deux durées propres différentes alors que l'on peut apparemment échanger les points de vue ? Réponse, on ne peut échanger les points de vue : la situation --- telle qu'elle est décrite ici --- n'est pas symétrique car les deux histoires se distinguent par le fait qu'Albert a subi des accélérations durant son voyage et qu'Isaac n'en n'a pas subi[7].

Autre question parfois posée : le problème doit-il être résolu en relativité restreinte ou en relativité générale ? Réponse : c'est indifférent ; les deux donnent exactement la même réponse[8] (si toutefois on imagine un voyage où des champs gravitationnels importants sont en jeu, l'usage de la relativité générale est exigé[9]).

L'historiette, proposée par Langevin en 1911, met en jeu des humains pour frapper les esprits. L'aventure telle que décrite est irréalisable en pratique (mais pas en principe) à cause des difficultés techniques à atteindre des accélérations importantes. Précisons que des versions matérielles --- impliquant des horloges et des décalages moindres mais parfaitement mesurables --- ont été parfaitement vérifiées.

Géométrie

Un des avantages de la physique einsteinienne est qu'elle fournit de tout ceci une description géométrique simple, claire et élégante, en termes d'*espace-temps*[10]. Selon cette vision « chrono-géométrique », introduite par Minkowski, un événement se représente comme un point dans l'espace-temps, une histoire est un segment de courbe dans l'espace-temps.

Il est intéressant d'établir une analogie avec un *trajet*, qui est un segment de courbe dans *l'espace*: la *durée propre* d'une histoire est exactement l'analogue de la *longueur* d'un trajet. La notion de *durée propre* dans l'espace-temps n'est pas davantage liée à un temps (ou une datation ou une chronologie), que la notion de longueur dans l'espace.

5 Cette version, ainsi que celles présentées la plupart du temps, diffèrent de celle originalement proposée ; voir à ce sujet Langevin ou le paradoxe introuvable, Elie During, Revue de métaphysique et de morale, n°4, 2014 (à paraître).

6 Je ne me prononcerai pas sur les liens exacts entre ces différentes appréhensions des durées.

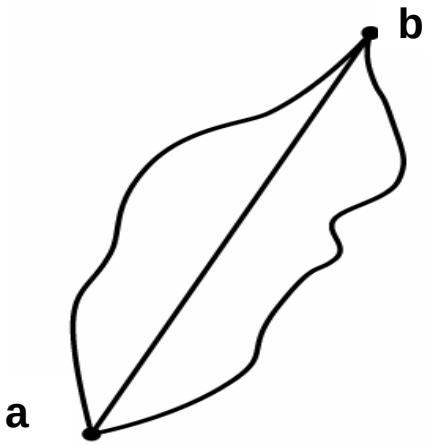
7 Analyse plus complète dans *Voyager dans le temps, op. cit.*

8 Idem

9 Mais pas du tout, contrairement à ce que l'on peut parfois lire ou entendre, lorsqu'il y a des *accélérations* importantes.

10 Rétrospectivement, dans un but pédagogique, on peut donner une description géométrique similaire de la physique newtonienne (elle apparaît cependant beaucoup moins naturelle). Cela permet de voir le passage de mais la physique newtonienne à la physique einsteinienne comme un changement de géométrie.

Deux histoires commençant par le même point-événement (A) et finissant par le même point-événement (B) ont des *durées propres différentes* (voir figure ci-dessous). Tout comme deux trajets commençant par le même point (a) et finissant par le même point (b) ont (en général) des *longueurs différentes*. L'analogie n'est pas du tout anecdotique mais révèle une parenté profonde entre la géométrie de l'espace-temps (minkowskien ou einsteinien) et celle de l'espace (euclidien).



Dans l'espace, la ligne droite est le trajet *de longueur minimale* entre deux points donnés a et b. Dans l'espace-temps, la ligne droite est l'histoire *de durée propre maximale* entre deux points-événements donnés A et B. Une ligne droite représente l'histoire d'un système qui ne subit aucune accélération (en géométrie de l'espace-temps, une accélération se représente par un angle). Ceci explique la différence entre les durées propres des jumeaux (voir plus haut).

Nous, les humains

Bien sûr, nous avons l'impression qu'il n'en est pas ainsi. Deux histoires commencent le 1er janvier 2013 place de la concorde (A) et se terminent toutes deux le 1er janvier 2014 place de la Concorde (B). Les deux fois, j'y étais, entre les deux, j'ai vécu un an. Vous y étiez, vous avez vécu un an également.
Il n'en est pas ainsi. Nous avons en fait vécu des durées propres différentes. Mais les différences sont indécelables à la précision de nos montres. À cette précision, tout se passe comme si nous avions vécu une seule et même histoire. Même si j'ai fait le tour du monde, escaladé l'Éverest, voyagé en avion supersonique, tout ceci ne m'écarte pas de l'histoire commune de l'humanité.
Cependant, si nos montres avaient la précision de nos meilleures horloges atomiques actuelles, ou si nous étions sensibles à des infimes échelles de temps, je pourrai m'apercevoir que j'ai vécu quelques fractions de secondes en plus ou en moins que mon voisin. Précisons que ceci a été vérifié expérimentalement (voir *Voyager dans le temps*, *op.cit.*).
Puisque nous tous, les humains, vivons la même histoire (toujours à cette précision limitée), nous pouvons la baliser par les durées propres qui s'y écoulent : c'est ainsi qu'est défini notre temps propre commun, celui que Newton avait baptisé *temps universel*. Le terme se justifie aujourd'hui à condition de rapporter cette universalité à l'humanité, en tenant compte de la précision limitée de ses capacités de mesure. Dans la vie courante, pour des expériences de précision limitée, nous pouvons nous rapporter à ce temps universel, à la datation et à la chronologie habituelles qui y sont liées. Ce que l'on qualifie de *situation non relativiste* et qui, encore un fois, ne vaut qu'avec une précision limitée.

Les situations sont en revanche « relativistes » --- et ne peuvent s'accommoder de l'usage d'une notion de temps, universel ou autre --- dès que l'on exige une précision importante sur les mesures de type temporel ; dès que l'on sort de l'environnement terrestre ; dès que des vitesses rapides sont en jeu ; dès que la gravitation devient intense.

Un satellite ou une sonde spatiale ne suit la même histoire qu'un humain terrestre. Toute navigation ou télécommunication spatiale serait impossible si l'on supposait que le temps universel s'écoule pour lui (il s'est par exemple avéré impossible de faire fonctionner le système GPS sous une telle hypothèse). Idem pour les télécommunications et la navigation spatiales, en astronomie et en cosmologie, en physique des particules, et aujourd'hui même en laboratoire pour des expériences de grande précision…

L'impossibilité d'existence du temps est donc une réalité concrète, à prendre en compte dans les expériences, les mesures, les observations. Mais sa portée est ontologique: on ne peut plus aujourd'hui supposer que le temps fasse partie de la réalité physique objective du monde ; on ne peut plus supposer que ce soit le temps (un temps) qui régisse l'évolution des phénomènes et les physiciens ont appris à s'en passer. Ce qui est surprenant, peut être rassurant, c'est que la physique sans le temps semble par bien des aspects plus simple, plus élégante ! Question, l'évolution de notre physique fondamentale[11] nous éloignera-t-elle encore davantage de nos notions temporelles familières ?

■

[11] voir *Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique*, éd. Le Pommier 2008.

REPORTAGE

Le temps d'un tableau

Pierre Causeret, Dijon

Il est amusant de voir comment les inscriptions sur un tableau anonyme peuvent nous renseigner sur l'époque et le lieu où il a été peint. À condition d'avoir quelques notions d'astronomie.

Comment faire de l'astronomie avec des tableaux ? C'est pour une visite du riche musée des Beaux-Arts de Dijon, organisée par l'IREM[1] à destination d'enseignants de maths et de physique début 2014, que je me suis intéressé à la question. Un des tableau de ce musée montre des éphémérides où sont notées les heures de lever et de coucher du Soleil pour chaque jour de l'année, du 1er janvier au 31 décembre. Les chiffres sont parfaitement lisibles et cette table est reproduite à la fin de l'article. Quels renseignements peut-elle nous apporter ?

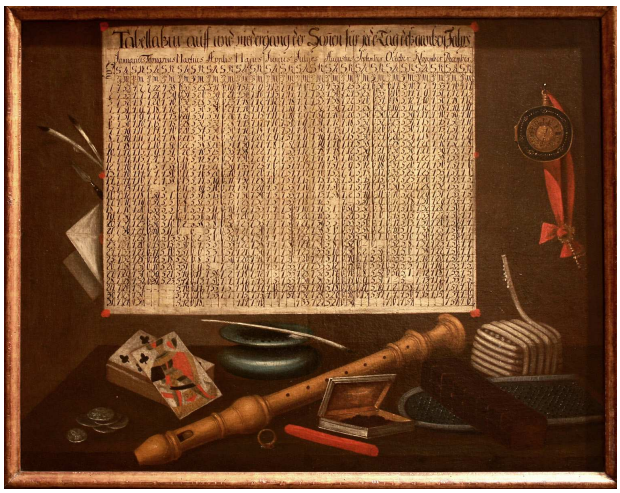


Fig.1. *Vanité ou Allégorie des cinq sens. Tableau du musée des Beaux-Arts de Dijon. École allemande XVIIe. Les cinq sens sont représentés ici : la vue (la mèche pour éclairer), l'ouie (la flûte), le toucher (les cartes), l'odorat (l'encrier), le goût (le tabac). La feuille remplie de nombres est intitulée « Tabellatur auff und niedergang der Sonen für jede Tag deß gantzen Jahrs »: Table du lever et du coucher du Soleil pour chaque jour de l'année entière (MBAD photo PC).*

Les heures utilisées

On peut vérifier que l'heure du lever et l'heure du coucher sont toujours symétriques par rapport à 12 h. Pour le 1er janvier par exemple, il s'écoule 4 h 07 entre 7 h 53 et 12 h et à nouveau 4 h 07 de midi à 4 h 07 (figure 2). Cela signifie qu'il s'agit d'heures solaires vraies locales[2]. L'heure solaire vraie est l'heure d'un cadran solaire classique. Il est midi au milieu de la journée quand le Soleil est au sud. Mais cette heure a plusieurs inconvénients, tout d'abord, elle n'est pas régulière, le jour solaire vrai ayant une durée qui varie légèrement. On utilise maintenant une heure solaire moyenne, réglée sur un jour constant de 24 heures. De plus, l'heure solaire vraie est une heure locale qui varie suivant sa longitude. L'heure de la montre est la même partout en France, c'est l'heure de Greenwich à laquelle on ajoute 1 h ou 2 h (heure d'hiver ou heure d'été).

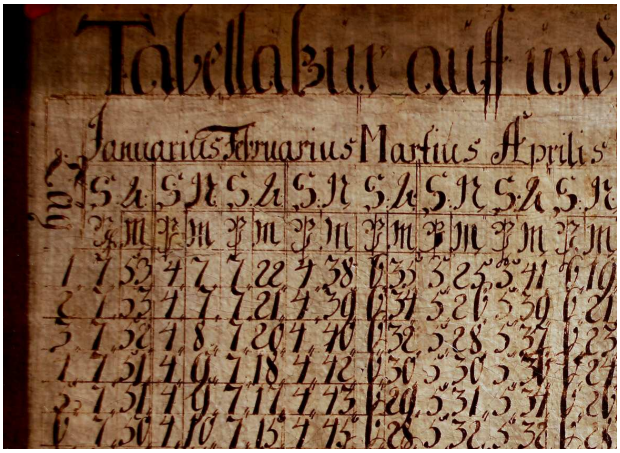


Fig.2. *Détail du tableau. Le 1er janvier, le Soleil se lève à 7 h 53 et se couche à 4 h 07. Les noms des mois sont en latin.*

La durée de la journée

Le tableau permet de calculer la durée de la journée. On trouve les journées les plus courtes entre le 18 et le 25 décembre, les plus longues entre le 18 et le 25 juin. Cela signifie que les solstices ont lieu autour du 21-22 décembre (hiver) et 21-22 juin (été). La journée et la nuit durent chacune 12 h les 21 mars et 23 septembre, les équinoxes ont donc lieu le 21 mars (printemps) et 23 septembre (automne). Ces

[1] Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques.

[2] Marie Noëlle Racine a relevé trois erreurs de copie puisque trois fois, cette symétrie n'est pas respectée (voir le tableau à la fin de l'article). Elle a d'ailleurs écrit un article sur ces éphémérides pour la « feuille de vigne » n° 124 une publication de l'IREM de Dijon qui devrait être disponible en ligne à l'adresse http://irem.u-bourgogne.fr/publications.html.

dates nous renseignent sur le type de calendrier utilisé.
Le calendrier julien, instauré par Jules César en –46, prévoit une année bissextile tous les 4 ans, ce qui donne une durée moyenne de 365,25 jours. L'année des saisons (intervalle entre deux équinoxes de printemps par exemple) dure en moyenne 365,2422 jours. L'écart entre les deux est minime sur une année mais après 16 siècles, l'équinoxe avait lieu le 11 mars au lieu du 21 comme il était prévu au début du calendrier julien. Cela avait de l'importance pour l'Église qui fixait la date de Pâques en fonction de l'équinoxe (premier dimanche suivant la pleine Lune qui suit l'équinoxe de printemps). En 1582, le pape Grégoire XIII décide de supprimer 10 jours de l'année pour que l'équinoxe revienne au 21 mars et modifie la répartition des années bissextiles (3 supprimées tous les 4 siècles) pour éviter un nouveau décalage. C'est le calendrier grégorien adopté à Rome en octobre 1582 et toujours en vigueur aujourd'hui. Les pays catholiques l'utilisèrent assez rapidement mais les pays protestants préférèrent pendant longtemps garder le calendrier julien pourtant imprécis, plutôt que de prendre un calendrier plus juste mais papiste. L'Allemagne catholique l'adopta en 1583 mais seulement en 1700 pour les régions protestantes.
Sur le tableau du musée des Beaux-Arts, noté école allemande XVII^{e} siècle, l'équinoxe a lieu le 21 mars. Il s'agit donc du calendrier grégorien. Et à cette époque-là, il n'était adopté que dans les régions catholiques. Cela apporte donc un renseignement précieux si ce n'est sur l'origine du tableau, au moins sur l'origine des éphémérides utilisées. Mais ce n'est pas terminé.

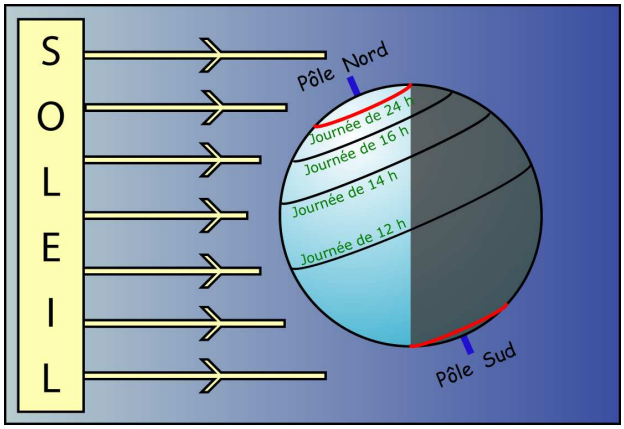
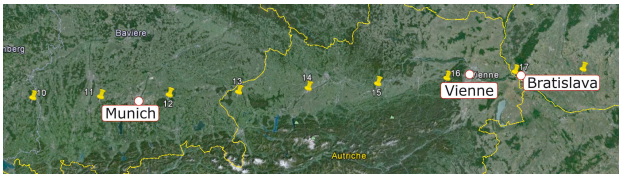


Fig.3. *La durée de la journée au solstice d'été dépend de la latitude.*

Le jour du solstice d'été, la journée dure 24 heures sur le cercle polaire alors qu'elle dure toujours 12 h à l'équateur. La durée de la journée le 21 juin nous renseigne donc sur la latitude du lieu. Le tableau indique le lever du Soleil à 4 h 04 le matin, le coucher à 7 h 56 le soir, donc une durée de 15 h 52 min pour la journée du 21 juin. Cette durée nous permet de connaître la latitude pour laquelle les éphémérides ont été réalisées.
On peut utiliser la formule cos H = - tan φ tan δ en remplaçant H par 119° (1 heure correspond à 15°, 15 h 52 min donnent 238° ou 2×119°) et δ par 23,49° (déclinaison du Soleil au 21 juin ou obliquité de l'écliptique au XVII^{e} siècle). On obtient une latitude de 48° 8'.

Conclusion

Il faut trouver une ville située à une latitude de 48° 8' N dans une région catholique sans doute d'Allemagne (école allemande). Plusieurs grandes villes correspondent : Munich en Allemagne (latitude 48° 9'), Vienne en Autriche (48° 12,5') ou encore Bratislava en Hongrie (48° 8,7') .
L'astronomie ne suffit plus pour départager ces villes ; on peut envisager de demander à un spécialiste d'observer certains détails du tableau comme les monnaies, la montre ou l'écriture.



Les repères jaunes sont tous à la bonne latitude. Les trois grandes villes indiquées sont de bonnes candidates.

Quelle précision peut-on attendre ?
Si les calculs du tableau sont corrects, on peut supposer que l'erreur est au maximum de + ou – 30 secondes le matin et + ou – 30 secondes le soir. Une variation de 30 secondes correspond à un écart de latitude de 3,4' ou encore 6,3 km sur le terrain. Munich et Bratislava peuvent convenir, Vienne est très légèrement trop au nord.

Une dernière remarque
Les spécialistes auront remarqué que l'on n'a pas tenu compte de la réfraction atmosphérique dans les heures de lever et de coucher du Soleil, contrairement à ce qui se fait aujourd'hui. En effet, la déviation des rayons lumineux par l'atmosphère fait que l'on voit le Soleil se lever quelques minutes avant qu'il n'ait dépassé l'horizon géométrique, ce qui allonge la durée de la journée.
Sur le tableau, les heures données pour le lever et le coucher le 21 mars et le 23 septembre (6 h – 6 h) montrent que, effectivement, on n'a pas tenu compte ici de la réfraction. Ce qui signifie que ces heures ne sont pas le résultat d'observations mais de calculs.

L'éclipse de Soleil du 20 mars 2015

Cela faisait longtemps que l'on n'avait pas eu d'éclipse de cette importance en France métropolitaine puisque le pourcentage de la partie occultée du disque solaire varie de 58% (en Corse) à 82% (en Bretagne).
Elle aura lieu un vendredi matin, le jour de l'équinoxe, en dehors des vacances scolaires. Ce sera une excellente occasion pour organiser une observation avec vos élèves en prenant évidemment toutes les précautions indispensables : observation avec un sténopé, par projection ou avec des filtres solaires certifiés.

Bastia(59 %)

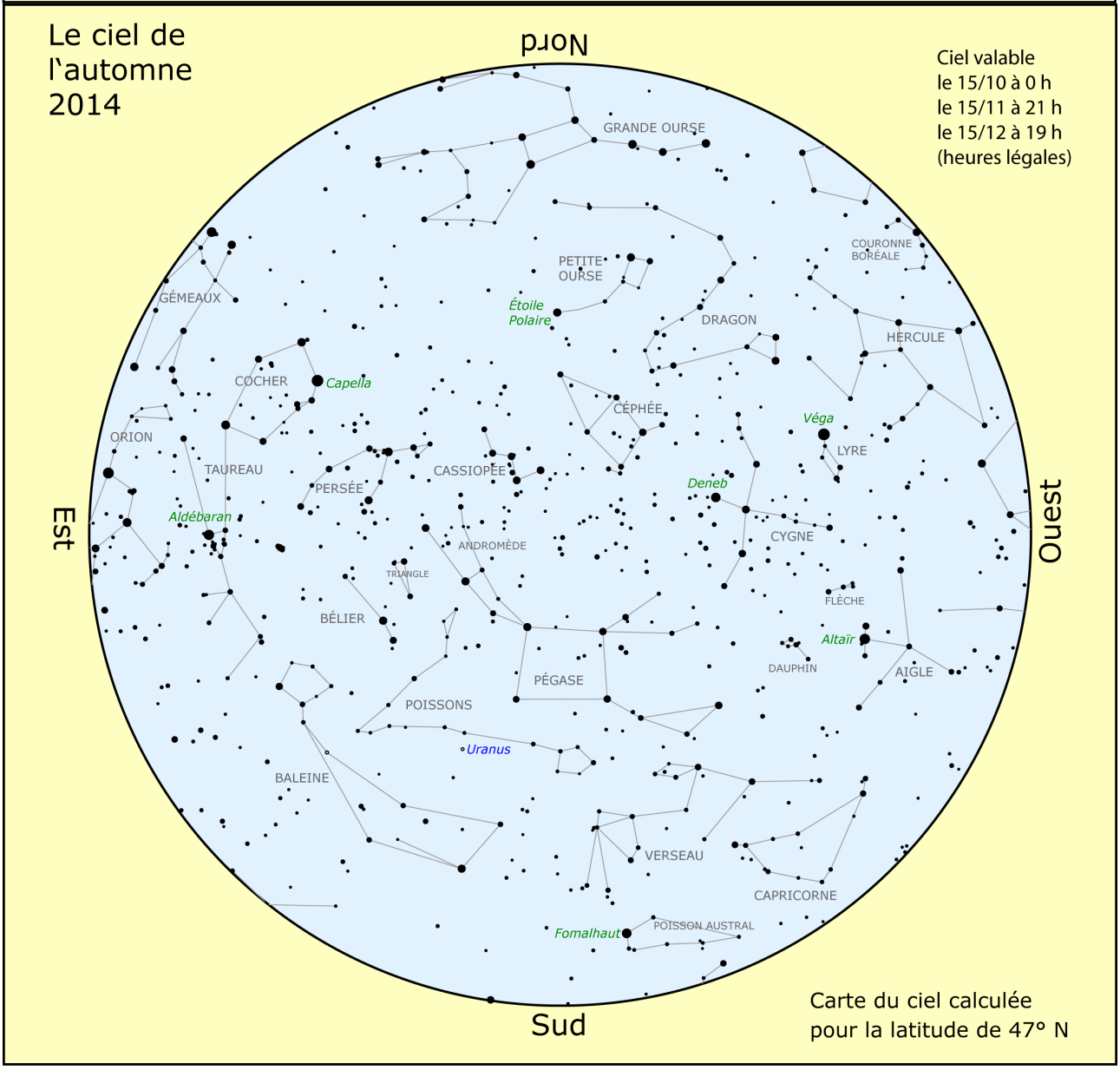
Lyon (70 %)

Paris (78 %)

Le numéro de décembre des Cahiers Clairaut reviendra sur cet événement pour savoir comment l'observer, la photographier… Vous trouverez dès maintenant des renseignements et des activités autour des éclipses dans le n° 131 des Cahiers Clairaut (septembre 2010), disponible en ligne gratuitement sur le site du CLEA (clea-astro.eu en cliquant sur Archives des Cahiers Clairaut). Toutes les données (horaires, pourcentage éclipsé) sont sur le site de l'IMCCE (imcce.fr, Grand public, les éclipses de Soleil).

Cette éclipse est visible au Groenland, en Europe, en Afrique du Nord et au nord-ouest de l'Asie. La bande de totalité passe dans l'Atlantique Nord, entre l'Islande et l'Écosse.

Le ciel de l'automne 2014



Visibilité des planètes

Mercure sera observable fin octobre début novembre le matin (élongation maximale le 1/11).

Vénus passe derrière le Soleil le 25/10 (conjonction supérieure). On la retrouve le soir fin décembre.

Mars continue à être visible le soir à l'ouest mais son éclat continue à baisser.

On peut trouver **Jupiter** en deuxième partie de nuit. C'est le début d'une série de phénomènes mutuels de ses satellites (occultation d'un satellite par un autre…). Vous trouverez des précisions sur le site de l'IMCCE.

Saturne est encore visible le soir au tout début de l'automne (conjonction avec le Soleil le 18/11).

Uranus peut être recherchée dans les Poissons (mag 5,7).

Quelques événements (heures légales)

23/09 : équinoxe d'automne à 4 h 28 min.
7/10 : opposition d'Uranus dans les Poissons.
8/10 : éclipse totale de Lune invisible en Europe.
19/10 : une comète frôle la planète Mars.
21/10 : maximum des Orionides (étoiles filantes).
23/10 : éclipse partielle de Soleil invisible en Europe.
25/10 : occultation de Saturne par la Lune (sortie tout juste visible en France à l'horizon ouest à 19 h 14 min).
17/11 Maximum des Léonides (étoiles filantes).
14/12 Maximum des Géminides (étoiles filantes).

Lune

Nouvelle Lune : les 24/09, 23/10, 22/11, 22/12.
Pleine Lune : les 8/10, 6/11, 6/12.

AVEC NOS ÉLÈVES

Le calendrier luni-solaire japonais

Sylvie Yamazaki-Dubois (ens. mathématiques), Jean Bazantay (ens. japonais)

Suite de l'article paru dans le « Cahiers Clairau »t n°146.

Calendrier luni-solaire

On rapelle les avantages d'un calendrier basé sur les mouvements du Soleil (les saisons reviennent chaque année aux mêmes dates ce qui est très important pour les travaux des champs) et ceux d'un calendrier basé sur les mouvements de la Lune (les phases de la Lune sont aisément identifiables et pratiques pour se repérer dans les petites durées).

On s'interroge ensuite sur les difficultés à élaborer un calendrier réunissant les deux.

Le problème du calendrier luni-solaire

Durée de l'année solaire (tropique) : 365,24 jours
Durée d'un mois lunaire ou lunaison : 29,53 jours
365,24 / 29,53 = 12,368
Il y a donc 12,368 lunaisons dans une année solaire.

29,53 étant encadré par les entiers 29 et 30, on peut penser à alterner des mois lunaires de 29 et 30 jours. On décide qu'une année (lunaire) sera composée de 6 mois de 29 jours et 6 mois de 30 jours alternés.
12 × 29,5 = 354 Une telle année contiendra 354 jours.
365 – 354 = 11 Il manquera 11 jours

Au bout de 2 ou 3 années lunaires il faudra rajouter un mois pour rattraper l'année solaire.

Nous allons voir comment ce mois supplémentaire est intercalé dans le calendrier traditionnel japonais.

Calendrier japonais

Une année comporte 12 ou quelquefois 13 mois lunaires qui commencent toujours à la nouvelle Lune (notée NL).
L'année solaire est divisée en 12 sections d'égales durées dont les dates de commencement (appelées *chûki*). figurent dans le tableau de la page suivante Ces dates correspondent à des positions de la Terre sur son orbite autour du Soleil, elles ont donc des dates fixes (à un jour près) dans le calendrier grégorien.
365,24 / 12 = 30,4 une période de **30,4 jours** sépare donc deux *chûki* :

Détermination du début de l'année

1. On inscrit les noms et dates des *chûki* (en vert).

2. On reporte les dates des nouvelles Lunes (NL) de 2012 en les intercalant entre les dates des *chûki* (en rouge).

3. En tenant compte des règles énoncées plus haut, on numérote les mois en commençant par le numéro 11 qui contient le solstice d'hiver et en remontant l'année.
On constate alors qu'entre le 21 mai et le 20 juin il n'y a pas de *chûki*. Il s'agit donc d'un mois intercalaire et il portera le numéro 4 bis.
Le mois numéro 12 (en fait le 13e mois de l'année) s'étendra du 12 jan au 10 fév 2013 et l'année suivante débutera ce 10 fév.

4. On recommence pour l'année 2013.

Remarques :
Il existe une autre règle, qui ne tient pas compte des heures, selon laquelle lorsque la nouvelle Lune et le *chûki* se produisent le même jour, on considère que la nouvelle Lune se produit avant.
Dans ce cas, pour 2012, le mois bis se trouve entre le 21 avril et le 21 mai et porte donc le numéro 3 bis. Le mois 4 s'étend du 21 mai au 20 juin. Le reste ne change pas.

Le calendrier chinois suit les mêmes règles mais l'heure japonaise n'étant pas l'heure de la Chine il peut y avoir aussi une différence sur le mois bis.

SOLEIL ET CHUKI 中気			LUNE ET MOIS 月			
Nom en français	**Nom en japonais**	**Date**	**NL en 2012**	**n°du mois**	**NL en 2013**	**n°du mois**
Grands froids	大寒 daïkan	20 jan	……..…….23 jan	…….	……...12 jan	……. 12
Pluies	雨水 usui	19 fév	……..….22 fév	1 ……. 2	……...10 fev	……. 1
Équinoxe de printemps	春分shunbun	21 mars	……....22 mars	……. 3	……11 mars	……. 2
Pluie de grains	穀雨 kokuu	20 avr	……..….21 avr	……. 4	……...10 avr	……. 3
Petite abondance	小満 shôman	21 mai 0h16*	.21 mai 8h47*	……. 4 bis	……..10 mai	……. 4
Solstice d’été	夏至 geshi	21 juin	……..….20juin	……. 5	……8 juin	……. 5
Grandes chaleurs	大暑 taisho	23 juillet	…..…….19 juillet	……. 6	…….8 juil	……. 6
Fin des chaleurs	処暑 shosho	23 août	……....18 août	……. 7	……..6 août	……. 7
Équinoxe d’automne	秋分shûbun	23 sep	……..…….16 sep	……. 8	……5 sep	……. 8
Arrivée du givre	霜降 sôkô	23 oct	……..…….15 oct	……. 9	…….5 oct	……. 9
Petite neige	小雪 shôsetsu	22 nov	……..….14 nov	10 ……. 11	……3 nov	……. 10
Solstice d’hiver	冬至 tôji	22 déc	……..….13 déc		…….3 dec	……. 11

* heure locale au Japon

Décalage des célébrations

En 2012, la nouvelle année commence le 23 janvier et en 2013, le 10 février. Le *risshun*, début du printemps (voir Partie 1) est le 4 février. Cela explique la salutation de nouvel an 迎春 (*Geishun*) qui célèbre l'arrivée du printemps. Cette salutation est encore employée de nos jours mais au 1er janvier donc loin du printemps.
Les *sekku* sont les fêtes traditionnelles japonaises. Il y en a cinq.

Au moment de l'adoption du calendrier grégorien, les Japonais ont cependant choisi de continuer de les célébrer aux mêmes dates (numéro du mois, jour du mois) car les chiffres 3, 5 et 7 sont considérés comme fastes.

Nom	Date calendrier traditionnel	Correspondance théorique dans le calendrier occidental 2013	Coutume
七草 *Nanakusa* (sept herbes)	le 7 du 1er mois	16 février	Fin des cérémonies du nouvel an. On mange une soupe composée de sept plantes
桃の節句 *Momo no sekku* (fête des pêchers) ou ひな祭り *Hinamatsuri*	le 3 du 3è mois	12 avril	Fête des filles : on expose des poupées représentant la cour impériale de l'époque Heian.
端午の節句 *Tango no sekku*	le 5 du 5è mois	13 juin	Fête des garçons : on accroche des carpes en tissus à un mât dans le jardin.
七夕 *Tanabata*	le 7 du 7è mois	13 août	
菊の節句 *Kiku no sekku* (fête des chrysanthèmes)	le 9 du 9è mois	13 octobre	

La célébration de ces fêtes s'effectue donc en avance par rapport à l'ancien calendrier et les conditions climatiques ne sont donc pas les mêmes qu'autrefois. Les pêchers ne sont pas fleuris le 3 mars pas plus que les chrysanthèmes le 9 septembre.

Le *Tanabata* est la fête des étoiles. Elle célèbre la rencontre de la princesse *Orihime* (étoile Véga) avec son amoureux le bouvier *Hikoboshi* (Altaïr) qui ne peut avoir lieu qu'une fois par an car ils sont séparés le reste de l'année par la *rivière du ciel* (la voie lactée).

Par contre, pour la contemplation de la Lune du 15 du 8e mois, il n'a pas été possible de la transposer au 15 août car il est impératif que ce soit une pleine Lune et d'autre part le plein été, chaud et humide donc avec un ciel souvent nuageux, n'est pas propice à l'observation de la Lune.
On peut noter également un décalage beaucoup plus ancien dans le nom des *chuki* eux-mêmes car ceux-ci ont été importés de Chine. Ces divisions climatiques établies en Chine du nord ne correspondent pas strictement aux réalités japonaises. Ceci a suscité certains proverbes humoristiques comme « la neige du petit froid fond au grand froid » ; la saison des pluies qui n'existe pas en Chine du nord retarde le début des grosses chaleurs.

Le décompte des heures, des jours et des années

Le décompte des heures et des années se fait suivant un cycle sexagésimal.

Le cycle sexagésimal

Les cinq éléments

Les anciens chinois pensaient que l'univers était le fruit de la combinaison de cinq éléments (dans cet ordre) : le bois (木 *ki*), le feu (火 *hi*), la terre (土 *tsuchi*), le métal (金 *ka*) et l'eau (水 *mizu*).

Les dix tiges célestes

Ces cinq éléments, dédoublés en aîné (兄, *é*) et cadet (弟, *to*), donnent naissance à dix tiges célestes qui sont utilisées pour compter les jours par cycles de dix (décades) :
1er jour : aîné du bois, 2ème jour : cadet du bois, 3ème jour : aîné du feu, etc.
Le mois lunaire comporte trois décades.

Les douze branches terrestres

Les douze branches terrestres (十二支) correspondent aux douze animaux utilisés dans le zodiaque chinois. À l'origine, elles étaient utilisées pour compter les mois de l'année. Aujourd'hui, elles servent surtout à désigner les années : rat (子 *ne*), bœuf (丑 *ushi*), tigre (寅 *tora*), lièvre (卯 *u*), dragon (辰 *tatsu*), serpent (巳 *mi*), cheval (午 *uma*), bélier (未 *hitsuji*), singe (申 *saru*), coq (酉 *tori*), chien (戌 *inu*) et sanglier (亥 *i*).

Ce cycle sexagésimal sert à compter les années et les jours par groupes de 60. Il est obtenu par combinaison des 10 tiges célestes et des 12 branches terrestres.

	rat	bœuf	tigre	lièvre	dragon	serpent	cheval	bélier	singe	coq	chien	sanglier
aîné du bois	0		50		40		30		20		10	
cadet du bois		1		51		41		31		21		11
aîné du feu	12		2		52		42		32		22	
cadet du feu		13		3		53		43		33		23
aîné de la terre	24		14		4		54		44		34	
cadet de la terre		25		15		5		55		45		35
aîné du métal	36		26		16		6		56		46	
cadet du métal		37		27		17		7		57		47
aîné de l'eau	48		38		28		18		8		58	
cadet de l'eau		49		39		29		19		9		59

Les heures

Les douze branches terrestres furent également utilisées à partir du IXe siècle pour indiquer les heures. La journée était divisée en 12 périodes, *toki* (時) d'une durée de deux heures chacune. Un *toki* était ensuite divisé en 4 parties égales. Il n'existait pas de plus petite subdivision du temps.

Le système des heures de durée fixe (fin du VIIe siècle ~fin du XIIe siècle)

Ce système fut copié sur le modèle chinois. La journée était divisée en 12 périodes de deux heures mesurées à l'aide d'une clepsydre (horloge à eau). À chacune d'entre elle, on avait attribué une branche terrestre dans leur succession habituelle. On les nommait respectivement heure du rat, heure du bœuf, heure du tigre etc.

Le système des heures de durée variable (XIII^{e} siècle ~ fin XIX^{e})

En prenant comme repères le lever et le coucher du Soleil, on distinguait tout au long de l'année six périodes dans la journée et six autres dans la nuit. En conséquence, la durée d'une période variait suivant les saisons. À l'époque d'Edo, on modifiait les horloges à chaque *sekki*. Le mouvement apparent du Soleil sur l'écliptique en une année est divisé en 24 sections d'égale durée, les dates de début de ces sections sont les *sekki* (節気). Les 12 *chûki* qui nous ont servi à établir le calendrier en font partie.

Ainsi au solstice d'hiver, une période durait 1 h 48 min pendant la journée et 2 h12 min pendant la nuit. Au solstice d'été, 2 h 36 min pendant la journée et 1 h 21 min pendant la nuit.

Les heures étaient indiquées à la population au son de cloches ou de tambours. Pour cette raison, le nombre de coups de cloche en vint à désigner l'heure : 9 coups pour midi et minuit, huit pour la deuxième heure du matin ou de l'après-midi, 7 pour la deuxième et ainsi de suite.

En 1886, ce système fut remplacé par celui que nous connaissons aujourd'hui.

La semaine

Au IX^{e} siècle est apparu un regroupement des jours en semaines de 7 jours dont les noms sont reliés aux sept corps du système solaire connus à l'époque. Ce système perdure, la semaine au Japon commence le dimanche.

jour		**Corps du système solaire**	
dimanche	日曜日 *nichiyôbi*	Soleil	日 *hi, nichi*
lundi	月曜日 *getsuyôbi*	Lune	月 *tsuki*
mardi	火曜日 *kayôbi*	Mars	火星 *kasei*
mercredi	水曜日 *suiyôbi*	Mercure	水星 *suisei*
jeudi	木曜日 *mokuyôbi*	Jupiter	木星 *mokusei*
vendredi	金曜日 *kinyôbi*	Vénus	金星 *kinsei*
samedi	土曜日 *doyôbi*	Saturne	土星 *dosei*

Les ères

Le système des cycles de soixante années est insuffisant pour établir une chronologie. Les années sont regroupées en ères et, depuis l'arrivée au pouvoir de l'empereur Meiji (1867), la durée d'une ère correspond à la durée du règne d'un empereur (autrefois, le nom de l'ère pouvait changer plusieurs fois sous le règne d'un même empereur). À sa mort, on désigne l'empereur par le nom de l'ère durant laquelle il a régné. Ce système est encore couramment utilisé dans l'administration. Au Japon, pour remplir un formulaire il vaut mieux connaitre sa date de naissance dans cette chronologie !

L'ère actuelle s'appelle *Heisei* (平成) qui signifie la paix accomplie, elle a débuté le 8 janvier 1989 au lendemain de la mort de l'empereur *Showa* (昭和). L'année 1989 porte donc deux numéros. Du 1er au 7 jan, il s'agit de la 64^{e} année de l'ère *Showa* et du 8 jan au 31 déc, il s'agit de l'année 1 de *Heisei*.

L'année 2014 est *Heisei* 26 (平成 26 年)

Les élèves recherchent les dates de début et de fin des ères précédentes (*Showa, Taisho* et *Meiji*) et résolvent de petits problèmes comme par exemple :

1. Trouvez une formule mathématique simple pour convertir les années japonaises de l'ère actuelle en années occidentales.
2. Retrouvez votre année de naissance dans le calendrier japonais.
3. Junko avait 10 ans en 1945. En quelle année est-elle née ?
4. Eiji a fêté ses 100 ans en 2010. En quelle année du calendrier japonais est-il né ?

Calcul de la durée du jour à Tokyo et à Paris au solstice d'été

Les élèves qui, pour beaucoup d'entre eux, font un séjour en France fin juin à la fin de l'année scolaire sont souvent étonnés de la différence des heures de tombée de la nuit entre la France et le Japon. La nuit tombe beaucoup plus tard en France à cette époque. Nous allons donc constater l'influence de la latitude sur la durée du jour. Cette activité est inspirée d'une activité du CLEA parue il y a quelques années dans les Cahiers Clairaut.

On essaie d'abord de se repérer sur la figure 1 dont seule une trame incomplète a été distribuée. On y inscrit les noms *équateur, tropique du cancer, pôles Nord et Sud*. On y fait figurer les rayons du Soleil et on schématise la partie dans l'ombre. Le point V figure une ville qui sera par la suite Tokyo puis Paris et en vert est représenté le parallèle passant par cette ville.

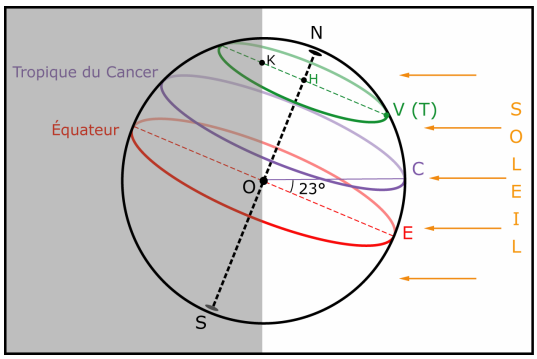


Fig.1. *vue d'ensemble.*

À Tokyo

Sur la figure 2 on retrouve les éléments de la figure 1 et on marque les angles droits : NOE, THO, COK. On recherche les données : L'angle EOT est la latitude de Tokyo soit 36°.
OE = OT = ON = rayon de la Terre = 6 371 km.
Exercice.
1. Quelle est la mesure de l'angle OTH ? Justifier. Calculer HT et OH.
2. Expliquer pourquoi les angles EOC et HOK ont même mesure. Calculer OK puis KH.

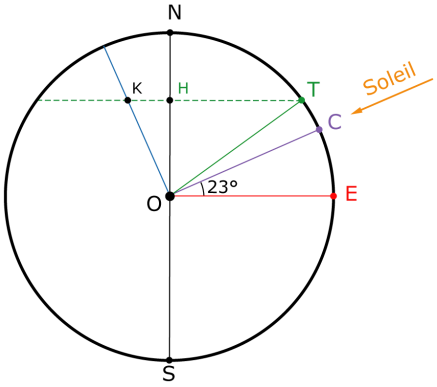


Fig.2. *coupe dans le plan méridien de Tokyo.*

Les élèves de 4ème disposent en mathématiques des outils cosinus (mais pas le sinus), théorème de Pythagore et égalité des angles alternes internes.
Les angles EOT et OTH sont égaux donc
OTH = 36°
Avec le triangle OTH rectangle en H on obtient HT = 6371cos 36° soit HT = 5154 km.
Les élèves peuvent calculer OH avec le cosinus de TOH ou le théorème de Pythagore. OH = 3745 km.
Les angles EOC et HOK ont comme complémentaire l'angle COH, donc
EOC = HOK = 23°.
Comme précédemment, le triangle OHK permet d'établir : OK = 4068 km et KH = 1589 km.
Sur une coupe suivant le parallèle de Tokyo, figure 3, on retrouve les points H et K précédents. On va chercher le rapport entre la longueur de l'arc RU et la circonférence du cercle pour évaluer la durée de la nuit à Tokyo.

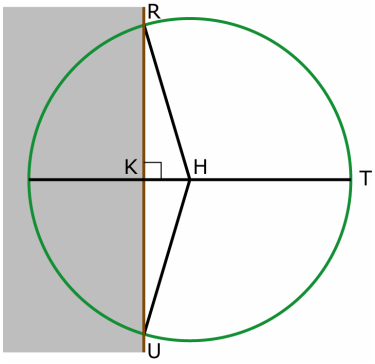


Fig.3. *coupe suivant le plan parallèle de Tokyo.*

Exercice :
1. Combien mesure HR ? Calculer les angles KHR et RHU.
2. Calculer le rapport entre la longueur de l'arc RU et la circonférence *C* du cercle. En déduire la durée de la nuit (c'est à dire le temps qui s'écoule entre le coucher du Soleil et son lever) et la durée du jour à Tokyo au solstice d'été.
Réponses :
1. HR = HT = 5154 km. cos KHR = KH / HR = 1589/5154 donc KHR = 72° et RHU = 144°.
2. RU/C = 144/360 = 2/5. Les 2/5 de 24 h font 9,6 h soit 9 h 36 min.
Durée du jour : 14 h 24 min durée de la nuit : 9 h 36 min
En réalité il fait jour bien avant que le Soleil n'apparaisse au-dessus de l'horizon (aube) et après qu'il s'est couché (crépuscule). Ceci est dû à l'atmosphère qui diffuse la lumière du Soleil. Le jour nous semble donc plus long et la nuit plus courte que ce que nous avons calculé.
On vérifie avec les heures de lever et de coucher de Soleil données par un calendrier :
lever : 4 h 27 coucher : 18 h5 9 soit une durée du jour de 14 h 32 min.

À Paris

On refait les mêmes calculs pour Paris, latitude 48°.
On trouve : durée du jour : 15 h 43min durée de la nuit : 8 h 16 min
D'après le calendrier : durée du jour : 16 h 07 min

La différence de durée du jour calculée entre Tokyo et Paris (moins de deux heures) est moins importante que ce que l'on constate. En effet fin juin il fait nuit peu après 19 h à Tokyo et vers 23 h à Paris. Il faut aussi faire intervenir les heures légales. En France en été l'heure légale est décalée de deux heures environ sur l'heure solaire alors qu'au Japon, l'heure légale est l'heure solaire d'un méridien proche de Tokyo. Autre différence : le crépuscule est moins long à Tokyo qu'à Paris. ■

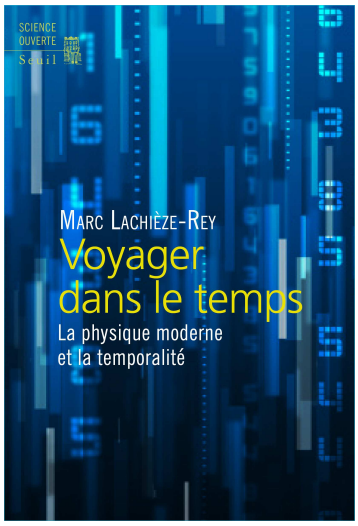
LECTURE POUR LA MARQUISE

Voyager dans le temps

La physique moderne et la temporalité.

Marc Lachièze-Rey, Seuil 2013

Ce livre devrait devenir un ouvrage de référence ; il brosse un tableau particulièrement clair et cohérent de la question du temps. L'auteur prend nettement position il indique qu'il n'y a pas de raison scientifique de considérer le temps comme une propriété ontologique de la nature.



Le temps est un « truc » utile et commode dans la vie de tous les jours. En mécanique newtonienne, il permet d'écrire des équations très simples, de dater les événements selon une certaine chronologie et de préserver le principe fondamental de causalité…

Mais même en mécanique newtonienne on ne mesure pas vraiment une durée, on enregistre des coïncidences entre des phénomènes dont l'un d'eux est considéré comme une horloge. En énonçant que telle durée vaut une heure *« je vais au-delà du processus que j'enregistre », « je ne fais qu'observer que le processus que j'enregistre et le tour de la petite aiguille de ma montre coïncident, rien de plus ».*

En relativité restreinte, selon Minkowski, *« l'espace et le temps s'évanouissent en tant qu'entités autonomes » ;* ils se réduisent « *à des ombres* » et laissent la place *« à une sorte d'union des deux qui seule conservera une réalité indépendante* ».

Il n'y a pas un temps déjà existant qui se déformerait dans certaines situations, une sorte de temps élastique. Il est faux de dire que le temps ne s'écoule pas pour moi de la même manière que pour quelqu'un de la planète Mars ; il n'y a aucun temps commun à lui et à moi.

L'esprit humain reste formaté par le temps absolu et universel de Newton. Pour l'auteur, la notion de temps en relativité n'a ni sens ni pertinence.

En relativité il n'y a pas de mesures communes de temps mais seulement des durées propres à chaque objet (caillou, planète, étoile ou observateur …) associées à une ligne d'univers spécifique dans un espace-temps courbé par la gravitation. Ainsi chaque objet, chaque observateur possède sa ligne d'Univers (ou ligne de vie). Cette ligne relie les événements constituant son histoire. Les durées propres de chacun sont mesurées le long de cette courbe d'univers. Chaque durée propre est différente de celle des autres mais, à notre échelle, les différences sont si faibles que tout se passe comme si ces durées propres étaient confondues et regroupées dans un temps universel.
Mais pour des êtres situés ailleurs, par exemple dans la galaxie d'Andromède, la date d'un événement terrestre n'aurait aucun sens ; chacun percevrait un même événement à une date différente. Il en résulte que l'on ne dispose plus d'une chronologie d'événements permettant, comme en mécanique newtonienne, un classement causal.

En ce qui concerne les voyages dans le temps, ils sont théoriquement possibles en relativité générale mais ce n'est pas parce certaines solutions des équations physiques semblent les autoriser qu'ils se produisent réellement. On arrive vite à des paradoxes comme celui dit du grand père : je vais dans le passé, je tue mon grand-père avant qu'il donne naissance à mon père. Donc mon père n'existe pas, donc je n'existe pas, donc je ne peux pas aller dans le passé pour tuer mon grand-père etc.

Ce livre est illustré de nombreux schémas très sobres mais qui favorisent grandement la compréhension des phénomènes.
En définitive, un livre qui devrait servir d'outil de compréhension pour tous et particulièrement pour les professeurs de terminale scientifique.

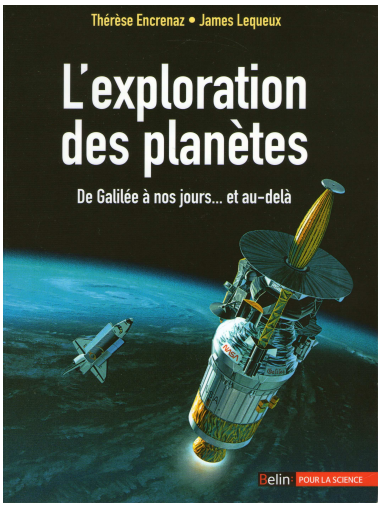
Christian Larcher

L'exploration des planètes

De Galilée à nos jours…et au-delà.

Th. Encrenaz – J. Lequeux, Belin PLS 2014.

Dans cet ouvrage, les auteurs nous invitent à embarquer pour un grand voyage qui se déroule sur quatre siècles à l'intérieur du Système solaire afin de retrouver la fabuleuse histoire des caractéristiques de chacun des astres qui le composent. Au cours de cette pérégrination vous découvrirez pourquoi les planètes telluriques (Vénus, la Terre et Mars) sont actuellement si différentes alors que leurs conditions initiales étaient sensiblement similaires. Vous retrouverez l'étrange histoire de la présence d'eau et pourquoi elle n'apparaît actuellement que sur la Terre. Vous comprendrez la signification de certaines anagrammes utilisées afin de revendiquer la priorité d'une découverte, par exemple la signification de l'anagramme citée par Huygens à la fin d'un ouvrage publié en 1656 et que je recopie laborieusement :
Aaaaaaa ccccc d eeeee g h iiiiii mm nnnnnnnnn ooooo pp q rr s tt uuuuu
Soit dans sa version latine : « *Annulo cingitur tenui plano nusquam cohaerente ad eclipticum inclinato* » qui pour ceux qui ne lisent pas le latin « *aperto libro* » signifie : [Saturne] « *est entouré d'un anneau plat et mince qui nulle part ne le touche et qui est incliné sur l'écliptique* »...



Ce livre renferme onze chapitres.
Le premier fait l'inventaire de ce que l'on connaît du Système solaire avant Galilée.

Le chapitre deux illustre les nombreuses applications de la *mécanique céleste triomphante* du XVIII^{e} siècle. Je signale particulièrement la découverte, entre l'orbite de Mars et de Jupiter, d'abord de Céres puis d'une multitude d'autres astéroïdes (actuellement plus de 300 000).

Le troisième chapitre concerne *la physique des planètes* en prenant pour « modèle » la Terre. On étudie par exemple l'effet de serre, la spectroscopie astronomique, la radioastronomie.

Le quatrième chapitre est consacré à la *pluralité des mondes habités*, d'après les œuvres d'imagination de Nicolas de Cues, *le Songe* de Képler, le *Banquet des Cendres* de Giordano Bruno, les écrits de Cyrano de Bergerac, les *Entretiens sur la pluralité des Mondes* de Fontenelle, les récits du jeune Camille Flammarion, les canaux de Mars de Schiaparelli…

Le cinquième chapitre traite de *la formation et de l'évolution du Système solaire*, des tourbillons de Descartes, des théories de Kant avec la contraction initiale d'un disque plat en rotation, de *l'Exposition du système du monde* de Laplace, puis des conceptions actuelles sur la formation et l'évolution des étoiles, des planètes et des comètes.

L'avènement de l'ère spatiale est décrit dans le sixième chapitre. Ce chapitre est particulièrement fourni, quelle profusion de découvertes depuis le lancement, en 1958, du fameux Spoutnik, en passant par les Mariner, le débarquement sur la Lune (en 1969), les sondes Voyager qui actuellement poursuivent leur route au-delà du Système solaire, la sonde Cassini-Huygens, enfin, la mission Rosetta dont la sonde, lancée en 2004, tourne autour de la comète Churyumov-Gerasimenko alors que celle-ci se rapproche du Soleil.

Avec le chapitre sept, on réalise l'évolution spectaculaire de l'observation au sol et en orbite terrestre, avec l'envoi du télescope spatial Hubble mais aussi le grand succès de l'optique adaptative utilisée pour les VLT au Chili, et dans un avenir assez proche, le projet du E-ELT (Extremely Large Telescope Européen) de 39,3 m déjà en cours de construction. (*ndlr, voir le CC 128*).

Le chapitre 8 étudie en détail l'apport scientifique considérable de ces pierres qui nous *tombent du ciel* en particulier pour l'hypothèse de l'origine de la vie.

Le chapitre 9 raconte l'épopée de la découverte des exoplanètes en commençant par 51 Pégase b, la première exoplanète découverte en 1995 à l'observatoire de Haute Provence.
L'avant dernier chapitre est prolixe sur les enjeux de la planétologie d'aujourd'hui.

Enfin comme il se doit le dernier chapitre aborde les perspectives dans le futur et en particulier les voyages éventuels vers d'autres mondes...
Cet ouvrage qui se lit facilement est une mine d'informations et possède, comme d'autres de la même collection, une riche illustration et de nombreux d'encadrés qui permettent d'approfondir certains aspects.

Christian Larcher ■

VIE DE L'ASSOCIATION

Au revoir Françoise

Le décès le 24 juin dernier, à 68 ans, de Françoise Suagher a attristé nombre d'entre nous tant chez les astronomes amateurs que professionnels. Affectée de graves troubles respiratoires depuis plusieurs mois durant lesquels elle a été accompagnée avec beaucoup de dévouement par son mari, elle n'a pas survécu à un arrêt cardiaque brutal et irréversible.

Bien des membres du CLEA la connaissaient et appréciaient son dynamisme, son enthousiasme et ses vastes connaissances. Animatrice infatigable, vulgarisatrice attachante, conférencière hors pair, écrivaine dont les ouvrages[1] font référence en particulier dans les domaines des calendriers et des phénomènes lumineux atmosphériques, elle était aussi un élément moteur de l'Association Astronomique de Franche-Comté dont elle était la présidente depuis 1992. Pendant dix huit ans elle a également animé avec beaucoup de passion un club d'astronomie dans l'établissement scolaire où elle enseignait les mathématiques et beaucoup de jeunes ont contracté le virus de l'astronomie à son contact.

Il est difficile d'être exhaustif dans le rappel des très nombreuses activités de Françoise. Sur Besançon on peut citer sa participation régulière aux conférences de l'observatoire et aux cours de l'université ouverte où ses interventions ont laissé un souvenir inoubliable à de nombreux participants mais son rayonnement allait bien au delà de la ville qu'elle habitait.

Personnalité hors du commun, elle a laissé à beaucoup de monde des souvenirs très vivaces. Vous pouvez en retrouver quelques uns sur le site Internet du CLEA qui accueille sur sa page[2] « À la Une » plusieurs textes écrits par quelques amis. La diversité de ces évocations montre bien sa grande richesse d'esprit et de cœur.

Sa curiosité insatiable et son désir de faire partager ses interrogations et de mettre ses connaissances à la disposition de tous faisaient partie de son caractère, comme l'écrit une de ses amie :*« ... je découvrais et j'admirais sa capacité de révéler à ses amis ce qu'il y avait d'intéressant, et pas seulement de joli, dans leurs clichés ! Nous partagions comètes, éclipses, phénomènes lumineux, étoiles et Lune traqués sous toutes les latitudes. Françoise et son mari Jean-François, malgré leurs multiples publications, conférences, stages, animations, expositions, étaient toujours accueillants et disponibles. »*

Jean-Paul Parisot nous rappelle sa position particulière dans le monde de l'astronomie :
« ... elle [était] dans le monde de l'astronomie l'une des rares personnes à avoir fait sa place entre 2 communautés, les amateurs et les professionnels. Avec une solide formation théorique en mathématiques et en physique, et un intérêt pour l'observation, son souci de tout comprendre l'a naturellement amenée à se questionner et à chercher les réponses auprès des professionnels quand elle ne les trouvait pas elle-même. Nous sommes plusieurs (ici et ailleurs en particulier au Bureau des Longitudes (aujourd'hui L'institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides où elle avait de bons contacts) à avoir été harcelés jusqu'à lui trouver la solution. Elle s'est ainsi constituée un réseau de correspondants qui a fait qu'elle était connue et appréciée par la communauté professionnelle. Moi personnellement j'avais droit à la question semestrielle ; ce qui est

[1] **« JEUX DE LUMIERE Les phénomènes lumineux du ciel »** - Françoise Suagher & Jean-Paul Parisot – Cêtre Éditions / « **Calendriers et chronologie** » - Jean-Paul Parisot & Françoise Suagher – Masson Éditions / « **L'Astronomie par la pratique** » - Jean-Pierre Marchand - Jean-Paul Parisot & Françoise Suagher – CRDP de FC (1988)

[2] http://clea-astro.eu

intéressant, c'est que dans les mois qui suivaient, elle réfléchissait, approfondissait la question et cela donnait lieu à une conférence, un article dans une revue … Rien ne l'arrêtait, elle allait jusqu'au bout ! C'est ainsi qu'elle a dû écrire au moins une centaine d'articles, ce qui est énorme pour quelqu'un qui n'est pas dans le circuit professionnel. ».

Beaucoup de ces questions étaient relatives à la question du temps[3] qui l'a passionnée tout au long de sa vie : que ce soient les calendriers, les cadrans solaires, les mesures ancienne et moderne du temps, tous les thèmes en lien avec ce concept facile à saisir mais difficile à comprendre ont toujours été pour Françoise source d'inspiration et d'approfondissement.

On ne peut pas non plus oublier ses engagements dans la formation des enseignants à travers les stages d'enseignants et les Universités d'été comme celle du col de Steige organisée par Agnès Acker qui se souvient avec poésie de notre « fée des lumières » qui a laissé dans tous les esprits un souvenir très fort.

Mais à ses grandes qualités intellectuelles venaient s'en ajouter d'autres : son franc parler, son humour, sa générosité mise au service de tous, son courage à affronter les difficultés et à franchir les obstacles ont été des éléments très importants pour faire de son environnement un espace de convivialité et de joie de se retrouver. Ces dernières années elle avait déployé une énergie considérable pour organiser des voyages culturels à dominante scientifique en Italie (2010), en Bavière, (2011), en Angleterre (2012), en Islande (2013) et aux Pays-Bas (2014). Déjà très diminuée, elle n'a pas pu participer au dernier de ces déplacements.

Chaque fois que nous croiserons un cadran solaire, chaque fois que nous saisirons un calendrier des postes, chaque fois que nous observerons autour du Soleil un halo ou un parhélie, le souvenir de Françoise nous reviendra à l'esprit avec la nostalgie de l'absence.

Pierre Magnien Avec la complicité d'Agnès Acker, de Marie-Noelle Bonbois, de Jean-Paul Parisot et d'une amie de Françoise. ■

[3] On peut remarquer qu'à côté de son intérêt pour le temps qui passe elle avait également abordé le temps qu'il fait à travers ses travaux sur les phénomènes lumineux atmosphériques toujours en relation avec la météorologie du moment.

Vingt ans d'école d'été au Col Bayard

Le CLEA a organisé du 19 au 26 août sa traditionnelle école d'été qui s'est déroulée au centre d'oxygénation de Gap-Bayard, lieu réputé pour son terrain de golf en été, ses pistes de ski en hiver et désormais pour la présence de passionnés du ciel durant une semaine à la fin du mois d'août. Cette année, ce fut la 20e fois que cette formation s'est déroulée au Col Bayard, un anniversaire fêté comme il se doit par stagiaires et animateurs ! À plus de 1200 m d'altitude la semaine a atteint des pics de convivialité ! L'astronomie a été abordée sous des aspects riches et divers, de la mythologie antique aux vastes connaissances actuelles de l'espace qui nous entoure. Une quarantaine de personnes venues des quatre coins de l'Hexagone, mais également de Suisse et de Libreville au Gabon, ont activement participé à cette école d'été dont la thématique portait sur l'étude de « l'univers froid et petits corps du système solaire et au-delà ». Après un accueil chaleureux et un premier repas pris en commun, les passionnés du ciel ont pointé les principales étoiles estivales visibles depuis cet endroit, avec des explications claires concernant les noms donnés aux constellations et la manière de les retrouver facilement sous la voûte céleste. Durant tout le stage, en soirée, télescopes et lunettes astronomiques ont notamment pointé la planète Saturne bien visible avec ses anneaux et des objets plus lointains comme les amas globulaires, les nébuleuses et autres galaxies. Après une balade matinale facultative à travers le golf, les cours ont abordé les rayonnements des étoiles dans différents domaines, la physique des galaxies et la « matière sombre » qu'elles contiennent, la détection des planètes extrasolaires, les accidents planétaires des météores aux cratères. Une étude de la géologie et de la climatologie martienne a permis de mieux connaître la planète rouge, notre proche voisine, sa constitution, l'existence d'eau présente actuellement à l'état de glace au niveau des calottes, une eau présente à l'état liquide il y a quelques milliards d'années à l'origine de la question qui stimule actuellement les recherches : « la vie est-elle apparue sur Mars ? ».

De belles images et vidéos ont permis de visualiser le sol martien et ses cratères balayés en permanence par de la poussière d'origine essentiellement volcanique, pouvant monter très haut du fait de la faible pesanteur de la planète. La cosmologie et le Big Bang ont permis d'aborder l'évolution de l'Univers, ses dimensions et sa composition. Dans notre proche banlieue, la Lune a été « dépoétisée » des rôles et croyances qu'on lui prête.

Les ateliers, nombreux et variés ont proposé aux stagiaires de réaliser maquettes et instruments scientifiques : spectroscope, fabrication d'un globe céleste, d'une carte tournante du ciel, théodolite, nocturlabe qui permet

d’estimer « l’heure solaire » en pleine nuit en pointant l’Étoile polaire et en s’appuyant sur les deux gardes de la Grande Ourse, détermination de la période de rotation du Soleil à partir de l’observation de taches qui se trouvent à sa surface.

Des logiciels ont permis l’exploitation de spectres et de photos à grand champ, l’étude de diverses trajectoires dont celles de comètes. Les constellations ont été reproduites sous un sympathique parapluie utilisable tel un planétarium ! Un planétarium gonflable a permis des discussions pédagogiques autour de l’utilisation de cet instrument dans le cadre scolaire. Une sortie au Haute-Correo a permis d’apprécier le matériel des astronomes amateurs de l’association Copernic. Un ciel nuageux n’a pas interdit les observations en soirée.

Un cadran solaire analemmatique pour fêter vingt ans de stage au Col Bayard et une belle conférence de clôture portant sur l’actualité scientifique de la sonde Rosetta

Pour sceller dans la pierre 20 années de collaboration entre le Centre d’oxygénation et le CLEA, les membres de l’association ont calculé puis réalisé devant le terrain de golf un cadran solaire analemmatique au sol. L’heure solaire est donnée par l’ombre de la personne qui se positionne sur le jour de l’observation. Ce jour se repère sur le calendrier dessiné sous forme d’échelle au sol. La personne se tient verticalement, éventuellement le bras levé pour préciser la direction. L’heure se lit alors sur l’ellipse matérialisée par des boules de golf numérotées en heures solaires de quatre à vingt. Le cadran a été inauguré en présence des responsables du stage avec la devise explicite : « astronome, golfeur, skieur, par ton ombre indique mon heure ».

Le stage s’est terminé par la conférence grand public donnée par le géologue-planétologue Sylvain Bouley, en lien avec l’actualité spatiale et portant sur la sonde « Rosetta, entre comète et astéroïdes ». La sonde européenne Rosetta, lancée il y a dix ans en 2004, vient d’être mise en orbite autour de la comète Tchourioumov-Guerassimenko le 6 août à quelques centaines de millions de kilomètres de la Terre, après un extraordinaire voyage spatial et des rencontres avec des astéroïdes. Une première mondiale qui permettra notamment d’obtenir des images « haute résolution » de l’astre. Le but de cette mission est, entre autre, la compréhension de la structure d’une comète, sa composition chimique grâce aux nombreux instruments de précision embarqués.

Lionel Muller ■

Solutions des mots croisés de la page 18

Horizontalement : 1. Clepsydres ; **2.** Heure. UAI (Union Astronomique Internationale) ; **3.** Ave. Césium ; **4.** La. Boson ; **5.** Dimension ; **6.** Inde. Nus ; **7.** Ernée. Asie ; **8.** Neuf. PL (pleine Lune). TC (abréviation de timecode, utilisé pour le son et l'image) ; **9.** Tierces ; **10.** Évection ; **11.** Sise. Trait.
Verticalement : 1. Chaldéennes ; **2.** Levai. Ré. VI ; **3.** Eue. Minutes ; **4.** Pr. Bénéfice ; **5.** Seconde. Et ; **6.** Esse. Prit ; **7.** Soi. Alcor ; **8.** Ruinons. ENA ; **9.** Eau. Nuits ; **10**. Sims. Sec. UT (Universal Time).

Écoles d'Été d'Astronomie

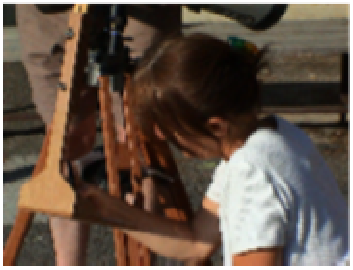
Vous souhaitez débuter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

Venez participer à une école d'été d'astronomie, au col Bayard, à 1 200 m d'altitude, dans un cadre prestigieux.

Des exposés accessibles à tous



Des ateliers pratiques et des observations

Toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements sur le site du CLEA

Voir la vidéo à l'adresse :

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

Les productions du CLEA

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.
Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques
Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, …

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie
Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, …

Matériel
Filtres colorés et réseaux de diffraction.

DVD
Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Écoles d'Été d'Astronomie).

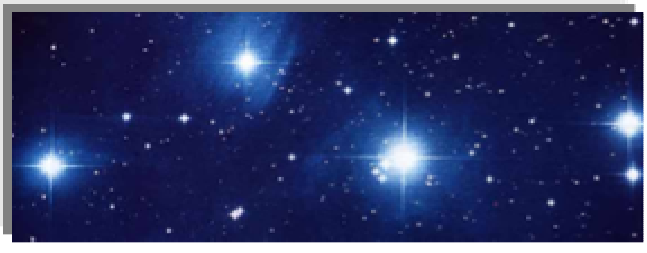
Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : **http://ventes.clea-astro.eu/**

Le formulaire de commande est sur le site

Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



LES CAHIERS CLAIRAUT

Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes (extraits, citations, analyses)
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu
ou
www.ac-nice.fr/clea

Siège Social :
CLEA, c/o CFEED
5, rue Thomas Mann
case courrier 7078
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :
daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :
christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :
http://ventes.clea-astro.eu/
Site internet :
berthomi@ac-nice.fr
charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2014 :	**10 €**
Abonnement CC pour 2014 :	**25 €**
Adhésion + abonnement CC :	**35 €**
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	**40 €**

Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : http://ventes.clea-astro.eu/

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari
Rédacteur de publication : Christian Larcher
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUÈS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368
Prix au numéro : 9 €
Revue trimestrielle : numéro 147 septembre 2014