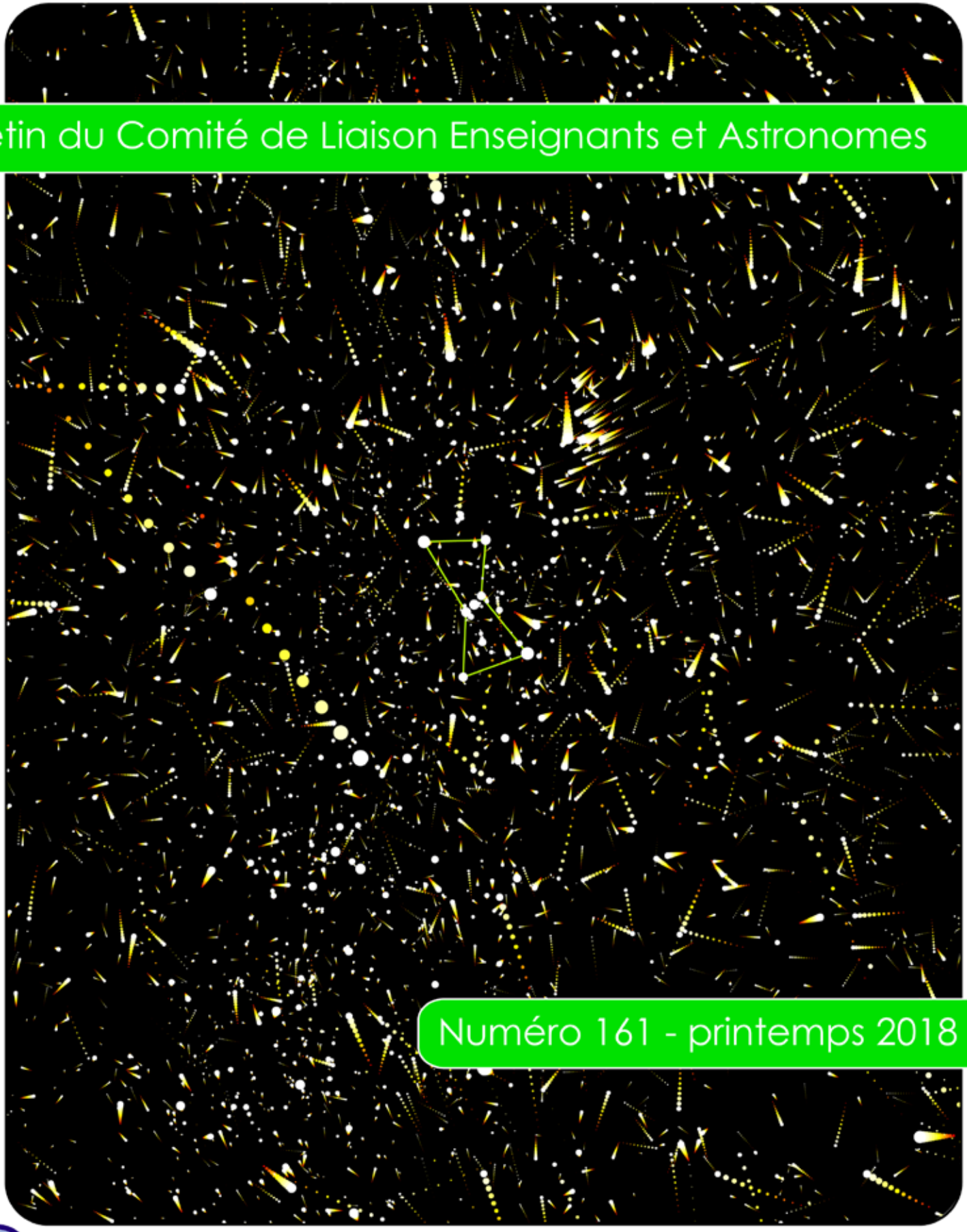
LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 161 - Mars 2018 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 161 - printemps 2018

ISSN 0758-234X

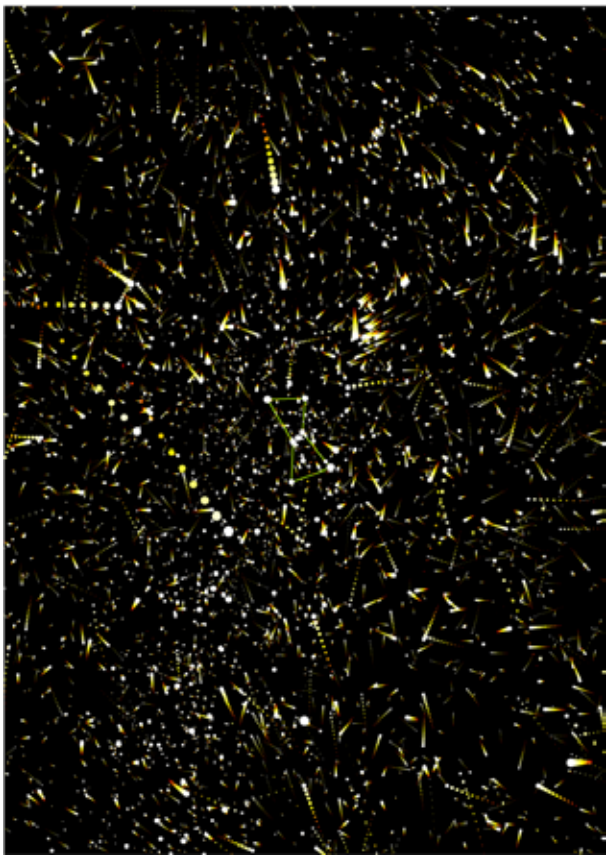
Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

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 2017
Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
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 celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Xavier Campi, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Jean-Luc Fouquet, François Hurter, Murièle Jacquier, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Anne-Marie Louis, Pierre Magnien, François Mignard, Gilles Remy, Jean Ripert, Béatrice Sandré.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 161 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

La couverture représente les mouvements propres des étoiles de la région d'Orion.

Chaque étoile a été représentée en petit et en rouge il y a 100 000 ans, puis tous les 10 000 ans, de plus en plus grosse et d'une couleur qui passe par l'orange et le jaune, pour arriver à la position d'aujourd'hui en blanc.

On peut remarquer que les étoiles principales d'Orion sont quasiment immobiles alors que Sirius a un mouvement propre important.

Vous trouverez page 9 d'autres remarques sur ce schéma.

Les Cahiers Clairaut

Printemps 2018

Éditorial

Le thème de ce numéro porte sur le concept de vitesse, une notion laborieusement construite par l'Homme pour rendre compte des propriétés du monde dans lequel il vit. Initialement une simple observation de la régularité du mouvement des corps célestes a conduit Aristote à définir des mouvements « parfaits » par opposition aux mouvements des objets sur Terre.

À la Renaissance apparaît la distinction entre mouvements naturels et mouvements contraints et il faudra attendre Galilée pour que l'on perçoive le mouvement d'un corps comme un « état » et non plus comme un « processus ». Pour la première fois le savant florentin écrivait dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* que le mouvement uniforme était « comme s'il n'était pas », qu'il était « comme rien » (p.17).

Le mouvement de la Terre autour du Soleil, qui se traduit en particulier par la variation de l'inclinaison des rayons du Soleil, contribue à expliquer le phénomène des saisons (p.7). L'alternance jour/nuit est expliquée par le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même, rotation confortée expérimentalement par l'expérience du pendule de Foucault (p.2).

La rotation du Soleil a d'abord été évoquée par Giordano Bruno comme raison possible du déplacement des taches du Soleil qu'il repérait à l'œil nu lorsque le Soleil était bas sur l'horizon, puis confirmée scientifiquement par Galilée grâce à sa lunette, mais c'est l'utilisation de l'effet Doppler-Fizeau (p.10) qui a permis d'en réaliser une mesure précise (p.12).

Les arcs-en-ciel furent toujours un sujet d'admiration mais également un objet de recherche. Depuis Newton, il nous est d'usage de distinguer sept couleurs alors qu'en réalité il y en a une infinité, l'ordre de ces sept couleurs se déclinant de différentes manières selon les langues (p.36).

Enfin, nous vous présentons une démarche scientifique qui permet d'expliquer pourquoi l'on peut affirmer que l'astéroïde `Oumuamua, découvert à l'automne dernier, provient réellement de l'extérieur du Système solaire (p.26).

Bonne lecture à tous.

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

Histoire
Une approche du pendule de Foucault
Christian Larcher p 2

Avec nos élèves
Un appareil pour comprendre les saisons
Pierre Causeret p 7

Thème : vitesses p 9

Notions de base
L'effet Doppler-Fizeau
Pierre Causeret p 10

Astrophysique
Mesure de la rotation du Soleil par effet Doppler
Xavier Campi p 12

Histoire
Le concept de vitesse, d'Aristote à Einstein
Pierre Magnien p 17

Astrophysique
'Oumuamua, vitesses cosmiques et trajectoires
Béatrice Sandré p 23

Histoire
Les étoiles en mouvement
François Mignard p 27

Mots croisés p 34

Observation
Ciel du printemps 2018
Pierre Causeret p 35

Curiosités
7 couleurs, 12 langues et quelques nuances
Anne-Marie Louis p 36

Vie associative
Assemblée générale du 28 janvier 2018
Jean-Luc Fouquet p 38

Des stages labellisés CLEA
Jean-Luc Fouquet p 39

L'École d'Été d'Astronomie du CLEA 2018
se déroulera à
Gap-Bayard du 17 au 24 août.
Plus de précisions en p.34

Une approche du pendule de Foucault

Christian Larcher

En 1851, Foucault invitait à venir à l'Observatoire de Paris, « voir tourner la Terre »... en regardant les oscillations d'un pendule ! Le chemin qui conduit de l'observation des oscillations à une interprétation en termes de rotation de la Terre n'est pas immédiat pour peu qu'on essaye d'identifier et de dépasser les obstacles. L'étude du pendule de Foucault cumule en effet plusieurs obstacles en particulier liés au changement de référentiel et à la difficulté d'admettre qu'un dispositif lié à la Terre puisse se déplacer comme si celui-ci en était indépendant mais aussi à une autre question, de nature plus philosophique, soulevée par Ernst Mach puis par Henri Poincaré : « S'il n'y a pas d'espace absolu, peut-on tourner sans tourner par rapport à quelque chose ? ». Pour les scientifiques la question de la rotation de la Terre ne se pose plus, la question philosophique de Mach reste entière.

Cette présentation du pendule de Foucault se situe à un niveau élémentaire.

Statue située sur la façade arrière de l'hôtel de ville de Paris

Introduction

Relativité des mouvements

Il arrive parfois que, lorsqu'on est assis dans un train, on éprouve un instant d'incertitude pour déterminer si c'est bien notre train qui démarre ou si, au contraire, c'est celui de la voie d'à côté. Si on ne dispose d'aucun repère fixe dans la gare, on ne peut pas le savoir immédiatement. Supposons qu'un piéton P assiste debout et immobile au départ du train. Pour ce piéton P le train s'éloigne progressivement. Dans le train, le voyageur V, immobile à sa place, voit son environnement proche immobile mais, s'il regarde par la fenêtre, il voit le piéton P, puis la gare fuir vers l'arrière du train. Ce qui est perçu par le piéton sur le quai d'une part et par le voyageur dans le train en marche d'autre part diffère car l'un et l'autre utilisent des référentiels différents. Pour le piéton il s'agit de la Terre dont il est solidaire, tandis que pour le voyageur c'est le train. On dit en physique que la perception du mouvement est relative au référentiel choisi. Cet exemple simple et familier peut servir d'analogie pour comprendre le mouvement apparent du Soleil et des astres vus depuis la Terre.

Notions élémentaires sur le Système solaire

Depuis Copernic et Newton, il est simple et commode de considérer que le Système solaire est constitué d'une étoile, notre Soleil, autour duquel gravitent des planètes qui, comme la Terre, tournent sur elles-mêmes. H. Poincaré, en bon mathématicien, explique que l'on pourrait tout aussi bien considérer une Terre fixe avec des astres qui tournent autour. Mathématiquement il n'y a pas de proposition plus vraie l'une que l'autre. Mais considérer le Soleil comme étant fixe, en première approximation, a un contenu nettement plus riche que lorsqu'il s'agit de la Terre.

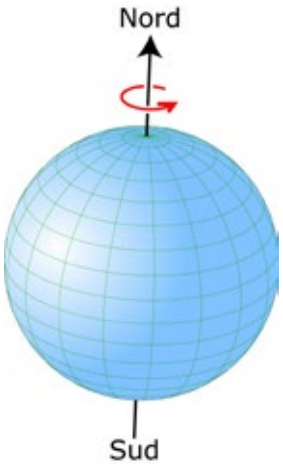
Il développe cet aspect dans *la Science et l'Hypothèse :* « la Terre tourne » et « il est plus commode de supposer que la Terre tourne » ont un seul et même sens ; il n'y a rien de plus dans l'une que dans l'autre » (Champs Flammarion 1968, page 133). Il revient sur ce point dans *La valeur de la science* (Flammarion 1970, page 185) : *... ces deux propositions contradictoires :* «la Terre tourne » *et* « la Terre ne tourne pas » *ne sont pas cinématiquement plus vraies l'une que l'autre. Affirmer l'une, en niant l'autre, au sens cinématique, ce serait admettre l'existence de l'espace absolu. S'il n'y a pas d'espace absolu, peut-on tourner sans tourner par rapport à quelque chose ?* Il fait cependant remarquer que la théorie copernicienne est nettement plus riche que celle de Ptolémée. « …le mouvement diurne apparent des étoiles, et le mouvement diurne des autres corps célestes, et d'autre part l'aplatissement de la Terre, la rotation du pendule de Foucault, la giration des cyclones, les vents des alizés, que sais-je encore ? Pour le Ptoléméen, tous ces phénomènes n'ont entre eux aucun lien ; pour le Copernicien, ils sont engendrés par une même cause. En disant, la Terre tourne, j'affirme que tous ces phénomènes ont un rapport intime… ».

Nous nous placerons par la suite dans la représentation copernicienne.

Dans le référentiel héliocentrique, la Terre tourne autour du Soleil en un an (par définition) à la vitesse moyenne

de 30 km/s soit 108 000 km/h. Autrement dit, toutes les heures, nous parcourons avec la Terre 108 000 km sur l'orbite de la Terre autour du Soleil.

Dans la suite du texte nous ferons, comme l'indiquait Foucault, abstraction de ce mouvement de translation circulaire du référentiel géocentrique (ce qui revient à confondre jour solaire et jour sidéral).



Dans le référentiel géocentrique[1] la Terre fait un tour sur elle-même en un *« jour solaire »* de 24 h. En d'autres termes au bout de 24 h on retrouverait de nouveau les étoiles dans les mêmes directions. La Terre tourne autour d'un axe imaginaire passant par ses pôles géographiques Nord et Sud. Cette rotation s'effectue dans le sens direct à condition d'orienter son axe du Sud vers le Nord. On peut dire aussi que c'est le sens inverse des aiguilles d'une montre si on regarde la Terre en étant situé au-dessus du pôle Nord. Pour nous, fixes par rapport à la Terre, c'est toute la sphère céleste qui tourne de 15° par heure dans le sens direct si on regarde vers le pôle Nord, très proche de l'étoile polaire sensiblement immobile. Si on regarde vers le Sud, les étoiles semblent tourner dans le sens des aiguilles d'une montre (sens indirect ou rétrograde) autour du pôle Sud.

Dans l'hémisphère nord l'étoile polaire est la seule que l'on voit à l'œil nu toujours dans la même direction. L'angle entre la direction de l'étoile Polaire et le plan horizontal local donne approximativement la latitude du lieu. Par définition la latitude du pôle vaut 90°, à l'équateur elle vaut 0°00, à Paris cette latitude est proche de 49° (plus précisément 48° 51'). Au pôle Nord, si l'on reste debout immobile par rapport à la Terre pendant 24 h on aura fait « seulement » un tour complet dans le référentiel géocentrique. Dans le même référentiel terrestre si l'on était immobile à l'équateur pendant ces mêmes 24 h on se serait déplacé d'environ 40 000 km (valeur du périmètre de la Terre), avec une vitesse de 1 670 km/h, c'est-à-dire environ 464 m/s dans le référentiel géocentrique.

1 Le référentiel géocentrique est un référentiel dont l'origine est le centre de la Terre et dont les trois axes pointent vers des étoiles lointaines.

L'œuvre de Léon Foucault (1819-1868)

L'histoire de l'expérience du pendule de Foucault

Ce scientifique de génie n'a vécu que 48 ans mais le nombre de ses inventions est impressionnant : détermination **dans un laboratoire** de la vitesse de la lumière, découverte des *« courants dits de Foucault »* utilisés pour le freinage électromagnétique des camions ou des autocars, invention des miroirs paraboliques en verre argenté pour les télescopes. Avant Foucault, ils étaient en bronze poli.

Mais son nom est plus particulièrement associé à l'expérience du pendule ; ce pendule ne démontre pas que la Terre tourne mais illustre une des conséquences de ce mouvement.

Le mouvement d'un pendule pesant résulte de son inertie. Plus sa masse est importante plus son inertie est grande. Si on l'écarte de sa position d'équilibre (la verticale du lieu), il tend spontanément à y revenir mais son inertie l'entraîne bien au-delà de la verticale et le phénomène se reproduit alternativement de nombreuses fois avant que les frottements de l'air diminuent progressivement son amplitude.

Le pendule de Foucault est assimilable à un pendule simple, sa période (durée nécessaire pour qu'il fasse un aller et un retour complet) augmente avec sa longueur.

Foucault fit sa première expérience, en janvier 1851, dans la cave de sa maison (un hôtel particulier qui

était situé au coin de la rue d'Assas au n° 36 et de la rue de Vaugirard n° 78). Un immeuble plus récent (photo ci-dessus) a pris la place de l'hôtel particulier qu'habitaient Foucault et sa mère.

Sur une plaque située à la partie droite de la photo ci-dessous, il est écrit :

Ici s'élevait un hôtel où mourût le 11 février 1868 Jean Bernard Léon Foucault, membre de l'Institut, né à Paris le 19 septembre 1819. C'est dans cet hôtel qu'il réalisa en 1851 la célèbre expérience qui démontre la rotation de la Terre par l'observation d'un pendule.

Côté rue de Vaugirard

Le pendule faisait deux mètres de long. Il refit son expérience à l'Observatoire de Paris, dans la salle de la méridienne, haute de 11 m. À l'époque il convia un public privilégié le 3 février 1851 à l'Observatoire en annonçant : *« Vous êtes invités à voir tourner la Terre, dans la salle méridienne de l'Observatoire de Paris ».*

À la demande du prince président Louis-Napoléon Bonaparte (futur empereur des Français), Foucault installe son pendule au Panthéon.

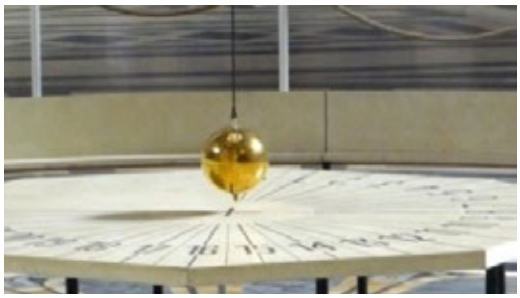
Celui-ci était constitué d'une sphère de 28 kg située à 67 m en-dessous de son point d'attache. Sa période (un aller et un retour) était de 16,4 secondes ; cette période est indépendante de l'amplitude du mouvement à condition que celle-ci reste faible (de l'ordre de 2,6° au Panthéon). Les oscillations du pendule étaient circonscrites dans un cercle de 6,0 m de diamètre au sol. Entre deux oscillations consécutives, on observait une déviation de l'ordre de 2,3 mm sur un cercle gradué centré sur la verticale du point d'attache du pendule. En moyenne environ 1 cm par minute soit 1° en 5 min. La grande longueur du pendule autorise à assimiler l'arc tracé dans l'espace par la boule à un segment de droite dont on peut repérer la direction par rapport au plan horizontal. C'est cette direction, qu'on appellera **la direction d'oscillation du pendule dans le plan horizontal** (ou trajectoire au sol).

Foucault montrait que la direction d'oscillation du pendule, repérée dans le plan horizontal, tournait lentement autour de la verticale du point d'attache par rapport au référentiel local. Cette rotation s'effectuait dans l'hémisphère nord dans le sens des aiguilles d'une montre, et il interprétait ce phénomène comme une conséquence de la rotation de la Terre. Les frottements de l'air diminuant l'amplitude des oscillations, le pendule du Panthéon ne fonctionnait que durant 6 h environ. Quand l'amplitude des oscillations devenait faible, une petite table munie de graduations centrée sur la direction du pendule au repos, permettait de faire des mesures (cf. photo ci-dessous). Plus tard dans le cadre de l'exposition universelle de 1855, Foucault utilisa un dispositif électromagnétique ingénieux qui compensait exactement les pertes d'énergie et prolongeait ainsi la durée de fonctionnement du pendule.

Les questions que Foucault s'est posées

Pourquoi ce pendule tourne-t-il ?

Foucault eut l'idée d'étudier sur le long terme l'évolution du plan d'oscillation du pendule. Il fut très surpris d'observer qu'il tournait lentement, toujours dans le même sens, ce qui était incompréhensible du fait de la seule action des deux forces appliquées : son poids et la tension du fil.



Comme il n'existait pas d'autres forces, il fit l'hypothèse que le phénomène résultait de la rotation propre de la Terre, qu'on ne pouvait plus ici négliger. Siméon-Denis Poisson (1781-1840), dans son mémoire sur les projectiles, s'était interrogé sur l'effet de cette force sur le pendule et avait conclu que son effet était *« trop petit pour écarter sensiblement le pendule de son plan et avoir une influence appréciable sur le mouvement »*. Léon Foucault par contre avait perçu que le pendule, par ses oscillations successives, avait *« l'avantage d'accumuler les effets ».*

Comment un objet relié à la Terre peut-il s'affranchir du mouvement propre de la Terre ?

C'est une question légitime que Foucault bien sûr s'est posée. Il rapporte avoir fait une expérience avec une tige vibrante en rotation : *« L'indépendance du plan d'oscillation et du point de suspension peut être rendue évidente par une expérience qui m'a mis sur*

la voie et qui est très facile à répéter. Après avoir fixé, sur l'arbre d'un tour et dans la direction de l'axe, une verge d'acier ronde et flexible, on la met en vibration en l'écartant de sa position d'équilibre et en l'abandonnant à elle-même. Ainsi l'on détermine un plan d'oscillation qui, par la persistance des impressions visuelles, se trouve nettement dessiné dans l'espace ; or on remarque qu'en faisant tourner à la main l'arbre qui sert de support à cette verge vibrante, on n'entraîne pas le plan de vibration ». Pour Foucault, le pendule lié à la Terre est comme la tige liée au mandrin.

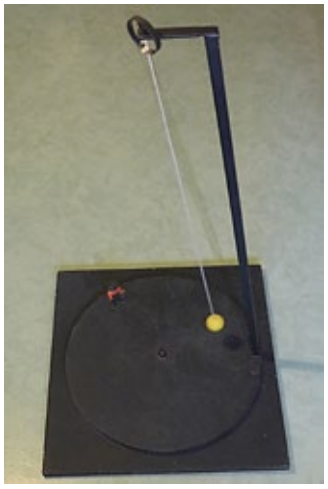
Pour vérifier les propos de Foucault j'ai refait cette expérience décrite à l'aide d'une perceuse électrique et une longue tige cylindrique en métal. J'ai fixé cette tige sur une perceuse maintenue horizontalement. J'ai mis son extrémité en vibration, d'abord dans le plan horizontal puis dans le plan vertical, enfin dans un plan quelconque en faisant tourner le mandrin de la perceuse à une vitesse constante mais quelconque. Dans tous les cas la tige continue à vibrer dans son plan initial **comme si le mandrin de la perceuse ne tournait pas**.

Par la suite Foucault a imaginé un dispositif extrêmement simple, plus proche de la situation du pendule accroché au Panthéon. L'illustration ci-dessous permet de refaire l'expérience. On met le pendule en mouvement puis l'on fait tourner le plateau sans à coup. Il est toujours surprenant de constater que le pendule continue d'osciller toujours dans son plan de départ, comme la tige fixée au mandrin.

La torsion du fil au cours des oscillations influe-t-elle sur les oscillations ?

Le pendule de Foucault est nécessairement fixé à la Terre, or celle-ci tourne très lentement sur elle- même, ce qui provoque une légère torsion du fil.

Foucault s'était interrogé sur l'effet de cette torsion et avait vérifié que, si le pendule est suffisamment long, cette très faible torsion ne modifiait en rien le plan d'oscillation du pendule.



Dans sa communication à l'Académie des Sciences en 1851 il écrivait : *« ...pourvu que le fil soit rond et homogène, on peut faire tourner assez rapidement sur lui-même dans un sens ou dans l'autre sans influencer sensiblement sur la position du plan d'oscillation ».*

Descriptions de ce qui se passe à différentes latitudes et interprétations

Le cas particulier du pendule au pôle Nord

C'est un cas particulier parce que le pôle Nord est immobile par rapport au référentiel géocentrique ainsi que le point d'attache du pendule. (Ce serait la même chose au pôle Sud mais on a plus l'habitude de raisonner dans l'hémisphère nord !) .

On met le pendule en mouvement dans une direction quelconque, que l'on peut repérer facilement, par exemple la direction d'une étoile très proche de l'horizon (ou sa projection sur l'horizon). Pour un observateur situé au pôle, immobile par rapport au sol, la direction d'oscillation du pendule dans le plan horizontal fait un tour complet sous ses pieds en 24 h, dans le sens des aiguilles d'une montre. Mais cet observateur a fait un tour sur lui-même dans ce même temps du fait de la rotation de la Terre !

Le pendule a en fait oscillé toujours dans le même plan par rapport aux étoiles (celui qui contient l'étoile repère et l'axe de la Terre) alors que la Terre « en dessous de lui » a fait un tour complet dans le sens direct.

On peut modéliser avec le dispositif de la photo ci-dessus en faisant en sorte que le petit carton planté dans la sphère avec une aiguille reste fixe par rapport à un repère extérieur dans la salle, et en faisant tourner la Terre. On peut embrocher sur une seconde épingle très proche un petit bonhomme pour voir qu'il tourne avec la Terre .

Le pendule à l'équateur

À l'équateur, si on met le pendule en mouvement dans n'importe quelle direction, il oscille toujours localement dans sa direction d'origine.

La verticale à l'équateur est toujours perpendiculaire à l'axe de la Terre et tourne avec la Terre, engendrant une surface qui a la forme d'un disque. La Terre ne tourne pas autour de l'axe du pendule, donc le pendule ne semble pas tourner autour de son axe, quelle que soit la direction dans lequel on le lance ; c'est l'axe du pendule qui tourne avec la Terre.

Le pendule entre le pôle et l'équateur

La loi du sinus

Foucault, dans sa note à l'Académie des Sciences du 3 février 1851, remarquait que si la direction d'oscillation du pendule dans le plan horizontal tourne de 360° par jour au pôle, par rapport au référentiel local, partout ailleurs, cet angle diminue d'un coefficient égal au sinus de la latitude du lieu d'expérience. Ce qui s'est appelé « la loi du sinus ».

La Terre met 6 h pour faire un quart de tour (soit 90°); pendant cet intervalle de temps, la direction d'oscillation du pendule dans le plan horizontal tourne d'un angle α donné par « la loi des sinus » :

$\boldsymbol{\alpha = \alpha_T \cdot \sin \lambda}$. Avec $\boldsymbol{\alpha_T}$ = angle de rotation de la Terre. λ = latitude du lieu

Soit à Paris, pour $\boldsymbol{\alpha_T}$ = 90°, α = 90° · sin 48,85 = 68° dans le référentiel local, soit 11,25° par heure.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de ω, vitesse de rotation de la direction d'oscillation du pendule, en fonction de la latitude λ pour différentes positions du pendule.

Position sur Terre	λ	sin λ	ω (°/h)
au pôle	90°	1	15
à Paris	48,85°	0,75	11,25
au Caire en Égypte ou La Serena au Chili	30°	0,5	7,5
à l'équateur	0	0	0

Dans l'hémisphère sud, ou trouve les mêmes valeurs avec des latitudes s'exprimant par la même valeur numérique, mais avec un sens de rotation opposé.

En un point quelconque de latitude λ (dans l'hémisphère nord, en dehors du pôle) on choisit de lancer le pendule dans la direction du nord. Par exemple à Paris au Panthéon dont la latitude est proche de 48° ; le sinus de cet angle λ vaut 0,75 c'est-à-dire 3/4.

La direction d'oscillation du pendule dans le plan horizontal semble tourner dans le sens horaire (inverse du sens de rotation de la Terre), mais quand la Terre aura fait un tour complet sur elle-même (360°), la direction d'oscillation du pendule dans le plan horizontal n'aura tourné, d'après « la loi du sinus », que de 360 · 3/4 soit 270°. Pour qu'il revienne dans sa position initiale il faudra qu'il tourne encore de 90° soit 8 h de plus. Pour que le plan d'oscillation décrive un tour complet il faudra donc attendre au total 24 + 8 = 32 h. Au bout de 32 h, le plan d'oscillation du pendule du Panthéon a fait un tour complet.

Notons que ceci est vrai quelle que soit la direction dans laquelle on lance le pendule. En fait, lancer le pendule vers l'est, par exemple, ne diffère de le lancer vers le nord que par l'heure à laquelle on le lance puisque le pendule passera à l'est quelques heures après qu'on l'a lancé vers le nord !

Foucault indique que l'on peut expliquer l'introduction du sinus soit par des considérations géométriques soit par une étude analytique.

Éléments d'interprétation

Essayons de nous représenter ce qui se passe ; les choses se compliquent car la verticale du point d'attache n'est plus confondue avec l'axe de la Terre comme au pôle ; mais il ne lui est pas non plus perpendiculaire comme à l'équateur ! Belfield-Lefèvre a donné une interprétation géométrique en 1852.

La verticale du lieu tourne avec la Terre ; elle ne décrit pas un disque comme à l'équateur mais un cône dont l'axe est l'axe de la Terre et le sommet est le centre de la Terre. Par ailleurs lorsque la Terre fait un quart de tour 90°, le point d'attache du pendule décrit un quart de cercle de latitude λ. La direction du nord, est la tangente au méridien local. Si l'on prolonge cette tangente vers le nord, elle rencontrera l'axe de rotation de la Terre au-dessus du pôle.

À une latitude donnée l'ensemble des tangentes au méridien forme un cône (celui qui est sur la figure précédente). Plus la latitude est grande (c'est-à-dire plus on est près de l'équateur), plus le sommet du cône situé sur l'axe de la Terre sera pointu et éloigné du pôle nord. À l'équateur, ce cône devient un cylindre centré sur l'axe terrestre.

L'axe du pendule tourne un peu avec la Terre comme à l'équateur mais la Terre tourne aussi autour de l'axe du pendule comme au pôle. C'est la combinaison de ces deux rotations qui régit le phénomène observé dont la loi du sinus rend compte quantitativement.

Conclusion

Nous avons présenté les questions que se posait Foucault sur les oscillations de son pendule (plus exactement sur la direction d'oscillation du pendule dans le plan horizontal) et des éléments d'interprétation de son comportement.

Dans un prochain article, nous nous proposons d'approfondir le sujet avec une description plus fine des oscillations, du statut de la « loi du sinus », de ce qui diffèrent suivant la latitude et sur ce qui est commun. L'introduction de la force de Coriolis permettra de rendre compte du phénomène. ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Un appareil pour comprendre les saisons

Pierre Causeret

On l'a vu pour la première fois au CLEA en novembre 2001 lors de l'assemblée générale à Lyon, il est déjà apparu dans les Cahiers Clairaut, mais il n'y avait jamais eu d'article qui lui était consacré. Voici donc présenté un appareil pour expliquer les saisons, à utiliser de préférence avec du chocolat.

Pourquoi fait-il plus chaud en été qu'en hiver ? On répond habituellement : parce que les journées sont plus longues mais aussi parce que le Soleil est plus haut dans le ciel (ces deux réponses provenant de l'inclinaison de l'axe de la Terre sur le plan de son orbite). Il est facile de comprendre le premier argument : lorsque les journées sont plus longues, le Soleil chauffe plus longtemps, il fait plus chaud. Par contre, comment expliquer le rôle de la hauteur du Soleil ? À midi, celui-ci culmine à 66° au-dessus de l'horizon au solstice d'été contre 20° seulement au solstice d'hiver, pour une latitude moyenne en France. Le dessin habituel montre qu'un même faisceau de lumière doit chauffer une plus grande surface en hiver qu'en été (figure 1).

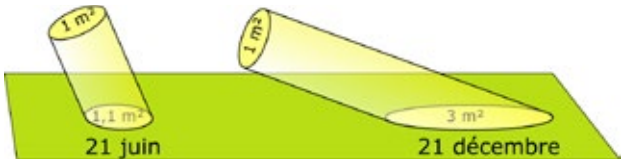


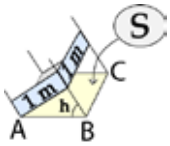
Fig.1. *Un faisceau de lumière de 1 m² de section doit chauffer une surface horizontale de 1,1 m² le 21 juin à midi contre 3 m² le 21 décembre.*

On propose aussi souvent l'expérience avec une lampe dirigée vers une feuille de papier sous un angle plus ou moins incliné pour montrer les variations de la surface éclairée.

L'énergie reçue par unité de surface est donc moindre en hiver qu'en été. On peut calculer qu'elle est proportionnelle au sinus de la hauteur du Soleil (voir l'encadré ci-dessous ou le hors série n° 10 des Cahiers Clairaut, *Maths et Astronomie,* page 20).

Petit calcul

Un faisceau de lumière à section carrée de 1 m par 1 m éclaire au sol le rectangle ABCD. L'angle que fait ce faisceau de lumière avec l'horizontale est noté h.



sin h = 1/AB donc AB = 1/sin h et BC = 1. Donc S = AB×BC = 1×1/sin h
Puissance reçue par unité de surface :
P/S soit P × sin h

Le premier appareil

En juillet 2001, eut lieu à Dijon une université d'été de l'OCCE sur le thème de l'enseignement des sciences de l'école au collège. J'avais prévu, avec l'enseignant de physique de l'IUFM, d'y présenter des « manips » permettant de comprendre les saisons. L'expérience avec une lampe tenue à la main ne me satisfaisait guère puisque la distance lampe feuille peut varier, d'où l'idée de fixer la source lumineuse sur un bras articulé. Pour mesurer les variations de puissance reçue, il suffisait d'emprunter les cylindres métalliques percés d'un trou que l'on utilisait au CLEA pour la mesure de la constante solaire. Ainsi est né mon premier appareil de démonstration de la variation de la puissance reçue au sol par unité de surface en fonction de la hauteur du Soleil.

Fig.2. *Le premier appareil présenté en 2001. La lampe au 1er plan est inclinée à 66° par rapport à l'horizontale et celle au 2e plan à 20°. Elles représentent le Soleil au solstice d'été puis d'hiver à midi. Elles chauffent un cylindre métallique dans lequel est inséré un thermomètre qui mesure l'élévation de température. La distance lampe cylindre est de 30 cm.*

D'après la figure 1, la quantité de chaleur reçue par le cylindre métallique éclairé par la lampe du solstice d'été inclinée à 66° doit être presque 3 fois supérieure à celle reçue par l'autre cylindre. Ce que confirme le calcul : sin 66° / sin 20° ≈ 2,7.

Quand on réalise l'expérience, il faut déjà laisser l'appareil reposer quelques heures à température

constante. On allume ensuite les deux lampes en même temps et on mesure à intervalles réguliers la température des cylindres (tableau 1).

t (min)	0	3	6	9	12	15	18	21
T1 (°C)	20	21,5	23,6	25,4	27,2	28,8	30,2	31,6
ΔT1 (°C)		1,5	3,6	5,4	7,2	8,8	10,2	11,6
T2 (°C)	20,1	20,6	21,3	22	22,5	23,2	23,7	24,2
ΔT2 (°C)		0,5	1,2	1,9	2,4	3,1	3,6	4,1
ΔT1/ΔT2		3	3	2,8	3	2,8	2,8	2,8

Tab.1. *Mesures de la température T1 dans le 1er cylindre et T2 dans le 2e. L'élévation de température ΔT est mesurée à partir de l'allumage des lampes (t = 0). La montée en température est presque linéaire pour chacun des cylindres mais elle ralentit vers la fin.*

L'expérience permet de retrouver ce rapport proche de 3, entre l'énergie reçue par m² au solstice d'été et au solstice d'hiver à midi.

Deuxième version

Lors de la première présentation, le public constitué principalement de professeurs des écoles a trouvé l'expérience intéressante mais plus adaptée à des élèves de collège ou de lycée que d'école élémentaire. L'idée est venue de visualiser au lieu de mesurer l'élévation de température en faisant fondre quelque chose. Le chocolat nous a semblé le plus adapté, aussi bien du point de vue scientifique que gustatif. J'utilise maintenant des carrés de chocolat, ceux que l'on sert habituellement avec le café, les plus plats possibles.

On dispose sous chacune des lampes un carré de chocolat et on allume les deux lampes. On peut essayer de faire deviner ce qui va se passer. Les deux carrés vont-ils fondre ? L'un des deux seulement ?

Fig.3. *L'expérience du chocolat est très visuelle et marque les esprits. Le soleil d'hiver (ici au 1er plan) chauffe moins que le soleil d'été, à cause de l'inclinaison de ses rayons. On peut vérifier que la distance lampe chocolat est la même sur les deux appareils.*

Après 5 minutes, on demande à un élève d'appuyer bien fort avec un doigt sur chacun des carrés. Le résultat est clair : l'un a fondu, l'autre non.

Construction

La première version de cet appareil utilisait des ampoules à incandescence de 100 W avec réflecteurs, mais on n'en trouve plus. On peut les remplacer par des lampes halogènes de 50 W avec réflecteur, qui éclairent sous un angle assez petit, 30° par exemple. Le plus simple est d'acheter deux spots ce qui permet un montage très simple.

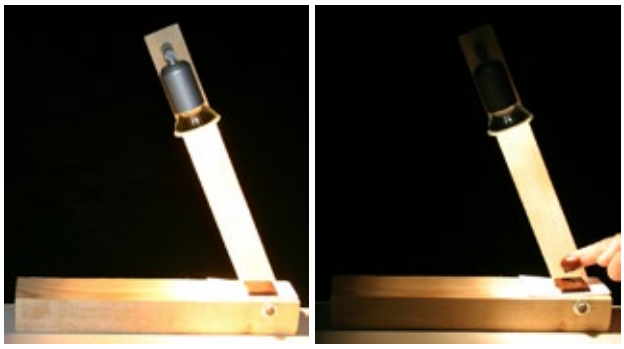


Fig.4. *Deux morceaux de bois, une longue vis et un spot suffisent pour construire cet appareil. Avec une lampe de 50 W située à 15 cm du chocolat, il faut moins de 5 minutes pour voir fondre le «chocolat d'été». Attention à ne pas laisser allumé trop longtemps, il ne faut pas que le « chocolat d'hiver » fonde aussi. Le temps varie en fonction du type de lampe, de sa puissance, de la distance mais aussi de la marque de chocolat. Il faut construire deux appareils identiques pour comparer les résultats avec deux hauteurs de soleil.*

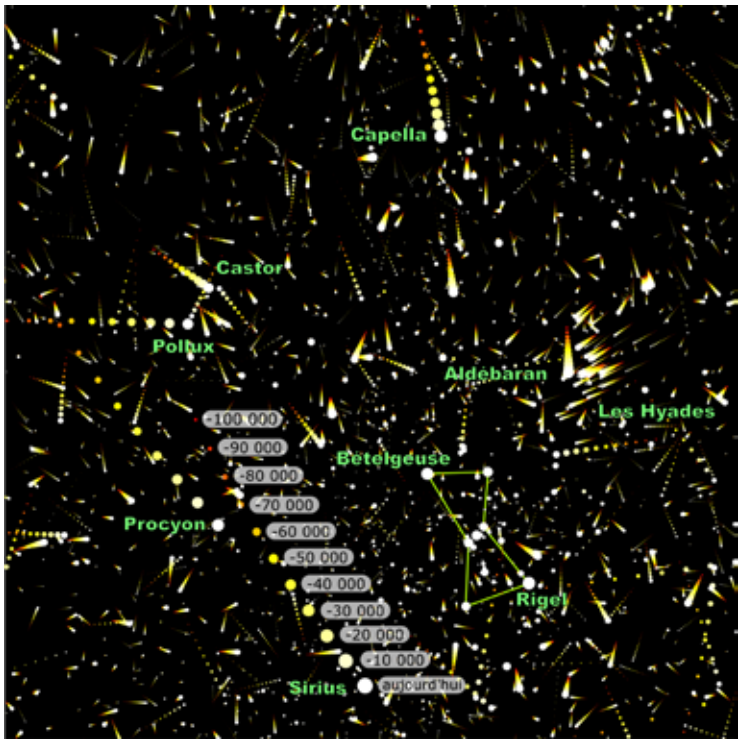
Fig.5. *Le modèle « Deluxe », avec double axe et réservoir à chocolat. Les deux axes sont simplement fixés sur une boîte en bois que l'on trouve facilement dans les magasins de loisirs créatifs (conception et fabrication JLF).*

À propos des deux arguments

La longueur de la journée varie approximativement d'un facteur 1 à 2 en France métropolitaine (8 h au solstice d'hiver, 16 h au solstice d'été) alors que la puissance reçue au sol par m² à midi varie presque d'un facteur 1 à 3. Quand on essaie d'expliquer pourquoi il fait plus chaud en été qu'en hiver, il serait dommage de ne parler que des variations de la longueur de la journée en oubliant celles de la hauteur du Soleil. ■

THÈME : VITESSES

Les articles qui suivent abordent des problèmes de vitesse dans l'Univers. Dans les images ci-dessous, on a illustré les vitesses des étoiles. Il n'y a aucune raison pour que celles-ci soient immobiles dans l'espace, elles ont leur vitesse propre, se déplaçant les unes par rapport aux autres. Mais leur distance par rapport au Soleil est telle que ce mouvement n'est pas perceptible à l'œil nu au cours d'une vie humaine.

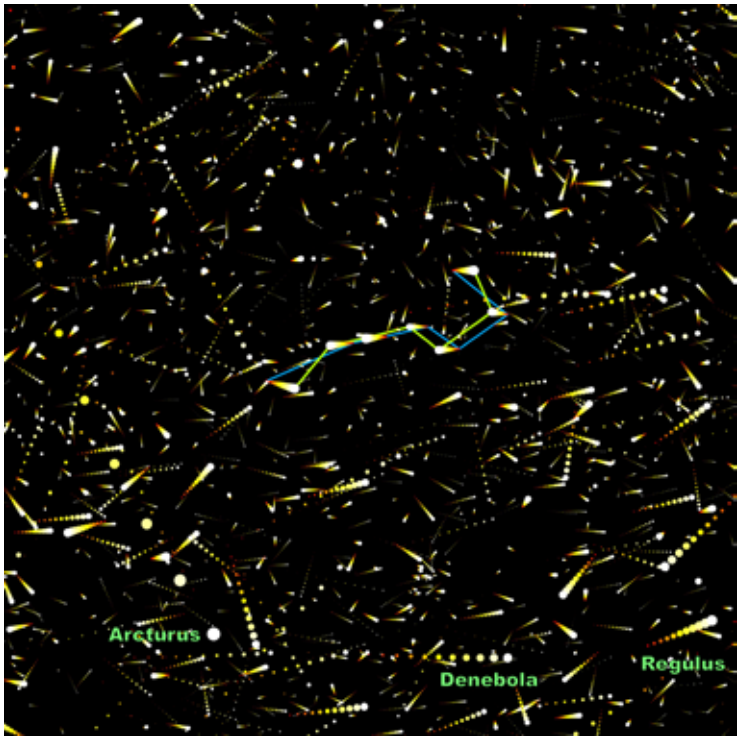


Sur cet extrait de l'image de couverture, la position des étoiles est indiquée tous les 10 000 ans. Sirius, par exemple, a été positionnée il y a 100 000 ans, 90 000 ans… jusqu'à aujourd'hui, du rouge vers le blanc et de plus en plus gros, pour représenter le temps qui passe.

Sirius est une étoile à mouvement propre important (1,3" par an), ce qui s'explique par sa proximité (8,6 al). Procyon, à 11,4 al, est presque aussi rapide.

Il est amusant de remarquer que, dans l'amas des Hyades, les étoiles ont la même direction. On peut d'ailleurs vérifier qu'elles ont quasiment la même distance (autour de 150 al) : ce sont des étoiles nées du même nuage de gaz. Par contre, on voit immédiatement qu'Aldébaran n'en fait pas partie, elle est d'ailleurs beaucoup plus proche (65 al).

Si on regarde du côté des Gémeaux, on s'aperçoit que Castor et Pollux ont des mouvements bien différents. Ils ne sont donc pas nés ensemble, contrairement à ce que raconte la légende…



Ici, la région de la Grande Ourse. Sur la gauche, Arcturus, qui est, parmi les étoiles brillantes, celle qui a le plus important mouvement propre après alpha du Centaure (2,3" par an).

La casserole a été dessinée aujourd'hui en vert et il y a 100 000 ans en bleu. Sur les 7 étoiles principales, 5 ont quasiment le même mouvement propre. Elles ont d'ailleurs presque la même distance (80 al). Elles appartiennent toutes au courant de la Grande Ourse. Comme dans les Hyades, ces étoiles doivent avoir une origine commune.

Dans la constellation du Lion, à l'inverse de la Grande Ourse, on n'observe pas de courant d'étoiles particulier.

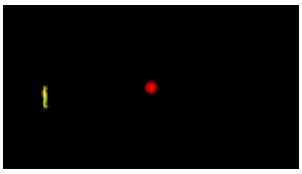
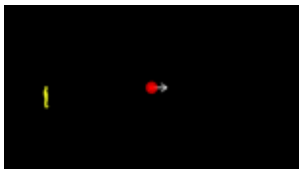
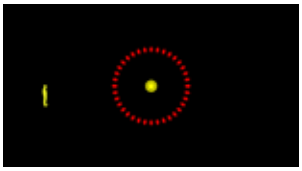
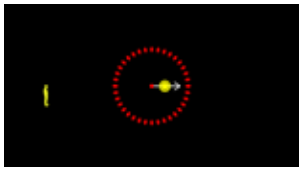
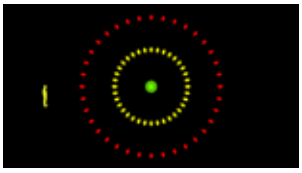
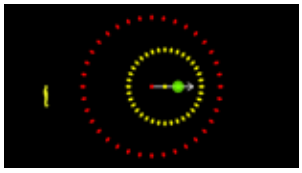
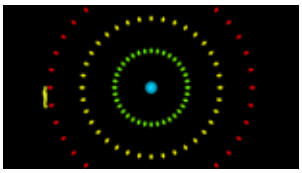
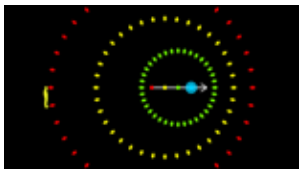
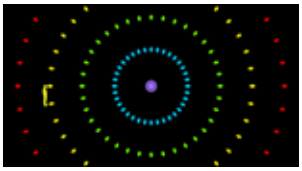
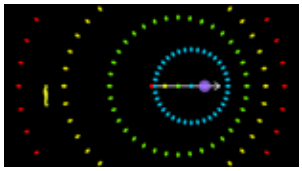
Ces cartes ont été réalisées à partir du catalogue Hipparcos pour les étoiles plus brillantes que la magnitude 6,6.

L'effet Doppler-Fizeau

Pierre Causeret, Esbarres

L'astronomie utilise très souvent l'effet Doppler-Fizeau comme vous pourrez le constater dans plusieurs des articles de ce numéro. Voici un petit résumé de cet effet. Les aspects historiques sont rappelés dans l'article de François Mignard.

Cet effet s'applique à tout phénomène périodique lorsqu'une source s'approche ou s'éloigne de l'observateur (ou lorsque l'observateur s'approche ou s'éloigne de la source). Nous utiliserons ici un exemple simple, un objet qui émet un bip sonore toutes les secondes. L'observateur est fixe. Dans le cas n° 1, à gauche, la source est fixe, dans le cas n° 2, à droite, elle s'éloigne de l'observateur.

t = 0 s		***Cas n° 1*** *Premier bip. L'onde sonore, représentée en rouge, commence à se propager dans l'air.*		***Cas n° 2*** *Premier bip. La source commence à s'éloigner.*
t = 1 s		*Une seconde plus tard, deuxième bip (en jaune). L'onde sonore du premier bip s'est propagée (en rouge).*		*L'onde sonore du premier bip s'est propagée (en rouge), la source s'est éloignée et émet son 2e bip (point jaune).*
t = 2 s		*Après deux secondes, nouveau bip (en vert). Les bips précédents ont continué à se propager dans l'air.*		*Nouveau bip (en vert). Les deux bips précédents ont continué à se propager dans l'air.*
t = 3 s		*Après trois secondes, 4e bip. L'onde sonore du premier bip (en rouge) arrive enfin à votre oreille.*		*Après trois secondes, l'onde sonore du premier bip vous arrive (en rouge).*
t = 4 s		*Une seconde plus tard, l'onde du deuxième bip arrive jusqu'à vous (en jaune). On entend ensuite un bip par seconde.*		*L'onde sonore du 2e bip (jaune) n'est encore pas arrivée. Il se passe plus d'une seconde entre la perception des 2 premiers bips.*

Quand la source s'éloigne, la période augmente pour l'observateur. Si on imagine dans le cas n° 2 un observateur situé à droite de l'image, pour lui, la source se rapproche et la période diminue.

La formule

Nous nous plaçons dans le cas n° 2 (la source s'éloigne) avec une période T quelconque. On appelle c la vitesse de propagation de l'onde, v la vitesse d'éloignement de la source et d la distance source-observateur au départ (à t = 0).

t = 0. Émission du 1er bip. L'observateur reçoit le signal à l'instant t_1 = d/c, le temps que l'onde parcoure la distance d.

t = T. Émission du 2e bip. La distance source-observateur a augmenté, elle est maintenant de :

d' = d + vT. Le temps pour que l'observateur reçoive le signal est égal à d'/c ou (d + vT)/c.

L'observateur reçoit donc le signal à l'instant t_2 = T + (d + vT)/c ou encore $\mathbf{t_2 = T + d/c + vT/c}$.

Entre les deux bips, il s'est écoulé pour l'observateur un temps égal à $t_2 - t_1$ = T + vT/c.

L'écart entre la période d'émission (T) et la période perçue (T + vT/c) est donc de vT/c. On obtient une variation de période ΔT = vT/c ce qui peut encore s'écrire :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{v}{c} \quad (1)$$

On donne souvent la longueur d'onde l de la source plutôt que sa période. Les deux grandeurs sont reliées par la formule λ = cT. On a donc :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{c\Delta T}{cT} = \frac{\Delta T}{T}$$

La formule (1) devient alors :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (2)$$

C'est l'écriture la plus courant de l'effet Doppler-Fizeau.

Si la source s'approche au lieu de s'éloigner, T et λ diminuent, ΔT et Δλ sont négatifs. Pour que la formule reste identique, il suffit d'écrire les vitesses d'approche avec un signe moins.

Cette formule s'utilise pour tout type d'onde si on reste dans le cadre de la physique classique. Elle est valable pour les ondes électromagnétiques si v est petit devant la vitesse de la lumière.

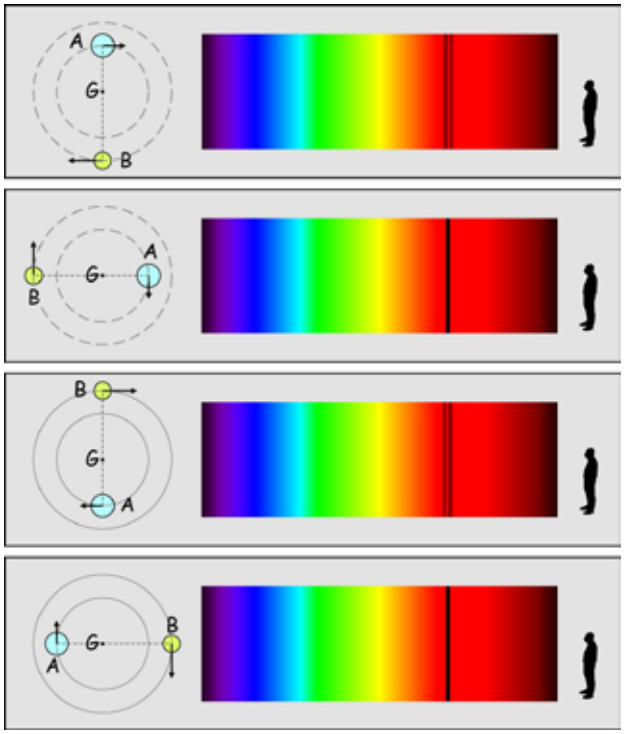
Quelques applications

L'exemple le plus courant est donné avec le son. Si une voiture passe devant vous, le bruit du moteur apparaîtra plus aigu lorsqu'elle s'approche (λ plus petit) que lorsqu'elle s'éloigne de vous. Même chose avec une sirène de voiture de pompier. C'est ce même phénomène qui permet à un «Doppler» de mesurer la vitesse d'écoulement du sang (par ultrason) ou à un radar automatique de mesurer la vitesse d'un véhicule (par micro-ondes).

En astronomie, il faudrait des vitesses énormes pour percevoir à l'œil des variations de longueur d'onde donc de couleur de la lumière des étoiles. Pour les étoiles de la Galaxie par exemple, les vitesses sont habituellement de quelques dizaines de km/s. Pour une étoile rapide s'approchant de nous à 300 km/s soit 1/1000 de la vitesse de la lumière, son décalage par effet Doppler-Fizeau sera d'un millième de longueur d'onde donc de l'ordre de 0,6 nm, indécelable à l'œil. De plus, toutes les longueurs d'onde sont décalées, une partie de l'infrarouge passant dans le rouge.

Pour détecter le phénomène, on utilise les raies d'absorption des spectres d'étoiles. Lorsqu'une étoile rayonne, sa lumière traverse l'atmosphère de l'étoile et les éléments présents (principalement de l'hydrogène) absorbent certaines longueurs d'onde. Si l'étoile s'approche, les raies de l'hydrogène par exemple ne seront pas aux longueurs d'onde attendues mais décalées vers le bleu (vers les courtes longueurs d'onde). Si l'étoile s'éloigne, le décalage est vers le rouge. La mesure de ce décalage par rapport à un spectre de référence permet de calculer la vitesse radiale de l'étoile (vitesse d'approche ou d'éloignement). Dans l'exemple de notre étoile s'approchant à 300 km/s, la raie H alpha de l'hydrogène habituellement à 656,3 nm se retrouvera à 655,6 nm.

La découverte des étoiles doubles spectroscopiques est aussi due à l'effet Doppler. Cette fois, il n'est même pas nécessaire de calibrer le spectre en longueur d'onde. Lorsque deux étoiles tournent l'une autour de l'autre, il arrive que l'une des composantes s'approche alors que l'autre s'éloigne, l'un des spectres est alors décalé vers le bleu, l'autre vers le rouge et les raies d'absorption apparaissent dédoublées. À d'autres moments, ni l'une ni l'autre ne s'approchent ni ne s'éloignent et il n'y a plus de dédoublement (voir figure). On a ainsi découvert des étoiles doubles dont les deux composantes sont trop proches pour être dédoublées optiquement.



Dans le premier schéma, l'étoile A s'approche et B s'éloigne. La raie Ha représentée ici est dédoublée.
Même chose sur le 3e schéma où B s'approche et A s'éloigne.
Dans les 2e et 4e schéma, les étoiles A et B ne s'approchent ni ne s'éloignent de l'observateur, il n'y a pas de décalage spectral.

L'effet Doppler-Fizeau ne détecte que la vitesse radiale d'une étoile et sa mesure est indépendante de sa distance.

Vous trouverez d'autres applications en astronomie dans les articles qui suivent.

■

Mesure de la rotation du Soleil par effet Doppler

Xavier Campi
Directeur de recherche honoraire au CNRS, ancien chercheur au LPTMS de l'Université Paris-Sud

Xavier Campi nous propose une mesure Doppler de la vitesse de rotation du Soleil effectuée avec le spectrographe à haute résolution de la Maison du Soleil de Saint-Véran. Cette description est précédée d'un bref rappel historique des observations sur la rotation du Soleil.

Historique

La mise en évidence de la rotation du Soleil a été concomitante avec la découverte par des savants des taches solaires et de leur mouvement. Cette découverte revient à plusieurs observateurs, dont le plus célèbre est Galileo Galilei, dit Galilée. Si Galilée ne fut probablement pas le premier à observer le phénomène, il fut cependant le premier à interpréter le mouvement des taches comme une rotation du Soleil.

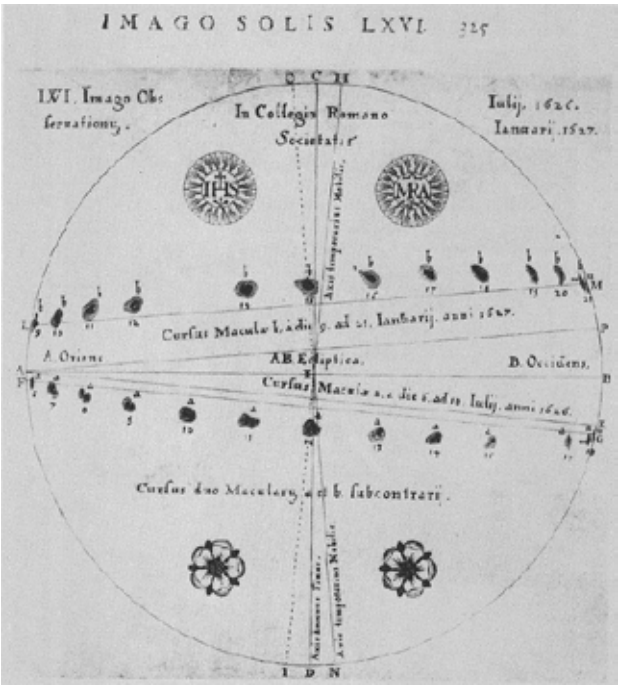


Fig.1. Observation du déplacement de deux taches solaires, faite par Christoph Scheiner. L'une en juillet 1626 et l'autre en janvier 1627. Remarquer les différentes inclinaisons de la trajectoire des taches par rapport à l'horizon terrestre (voir texte).

Pour Galilée, le fait que le Soleil tourne comme le fait la Terre, était une preuve supplémentaire de la validité du système de Copernic[1].

Cette interprétation du mouvement des taches fut vivement combattue par le père jésuite Christoph Scheiner, qui par ailleurs avait fait des remarquables observations du mouvement des taches (figure 1). En 1863 l'astronome amateur Richard Carrington découvrit que les taches solaires tournent plus vite à l'équateur qu'aux pôles. Le premier à faire des mesures de la rotation du Soleil par effet Doppler fut l'astronome américain W.S. Adams en 1909[2].

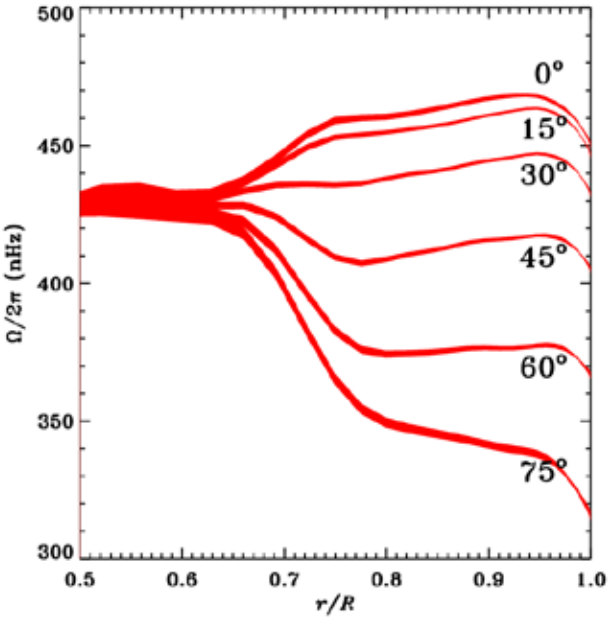


***Fig.2.** Périodes de rotation sidérale du Soleil en fonction de la latitude (0°-75°) et de la distance relative au centre[3].*

Actuellement, des observations héliosismologiques donnent accès à la vitesse de rotation à différentes latitudes et à celle des couches internes du Soleil (figure 2). Les modèles du Soleil qui rendent compte de ces résultats font appel à un mécanisme assez complexe de couplage entre la rotation et

1 Bernard Dame Galilée et les taches solaires 1610-1613 http://www.persee.fr/doc/rhs_00487996_1966_num_19_4_2508

2 Adams, W.S. 1909, Astrophys. J. 29, 110.

3 http://www3.leibniz-kis.de/~mroth/helioseismologie4_engl.html

les phénomènes de convection. Cette *rotation différentielle* n'est pas encore entièrement comprise.

Estimation des qualités d'un spectrographe capable de mesurer la vitesse de rotation du Soleil

Faisons, en premier lieu, une estimation de la grandeur du décalage Doppler entre deux rayons provenant des deux limbes de l'équateur du Soleil. Le diamètre de celui-ci étant de D = 1,39 × 10^6 km et la période de rotation par rapport à un repère galactique d'environ 25 jours, on trouve une vitesse de rotation d'environ v_s = +/- 2 km/s, mesurée respectivement aux deux limbes équatoriaux (figure 3).

Fig.3. *Le Soleil et la Terre vus d'un point situé au-dessus du pôle Nord du Soleil. Les points E et O sont situés sur l'équateur solaire. On considère ici que la Terre est dans le plan de l'équateur solaire.*

Le décalage Doppler résultant pour une longueur d'onde de λ = 589 nm (doublet du Na) doit donc être de $d\lambda = \lambda\, v_s/c$ = +/- 3,5 · 10^{-3} nm. Mesurant *simultanément* les décalages aux deux limbes équatoriaux, on double le signal et en prime on élimine des erreurs systématiques. Ce décalage de 7 × 10^{-3} nm correspond à environ 1/100 de la séparation entre les deux raies du doublet du sodium.

Le *pouvoir de résolution spectrale* R = λ/dλ d'un spectrographe définit sa capacité à discerner deux raies de longueurs d'onde λ et λ + *dλ* adjacentes.

Prenant $d\lambda = 7 \times 10^{-3}$ nm et λ = 589 nm, on estime que la résolution nécessaire pour estimer quantitativement le décalage Doppler entre les deux bords équatoriaux du Soleil doit dépasser R = 50 000. C'est une résolution assez élevée, qui n'est pas toujours disponible dans des petits observatoires. Nous allons décrire une mesure de ce décalage Doppler faite récemment avec un instrument accessible à une large communauté de praticiens de l'astronomie.

Le spectrographe SHARMOR de la Maison du Soleil de Saint-Véran (Hautes-Alpes)

La Maison du Soleil de Saint-Véran[4] est un musée interactif dédié à la physique du Soleil et aux multiples relations que nous entretenons avec lui. Il dispose de nombreux équipements destinés à un large public et aussi d'instruments scientifiques de grande qualité. L'équipement concerné par l'expérience Doppler sur le Soleil à été fourni par l'Observatoire de Paris-Meudon. Il comporte un cœlostat, destiné à capter la lumière solaire et à l'envoyer à l'intérieur du bâtiment, un train de miroirs pour la transmission du rayonnement à l'intérieur de celui-ci, et un spectrographe. Cet instrument, dénommé SHARMOR (acronyme de Spectrographe Haute Résolution Meudon Orsay) est un spectrographe de type Czerny-Turner.

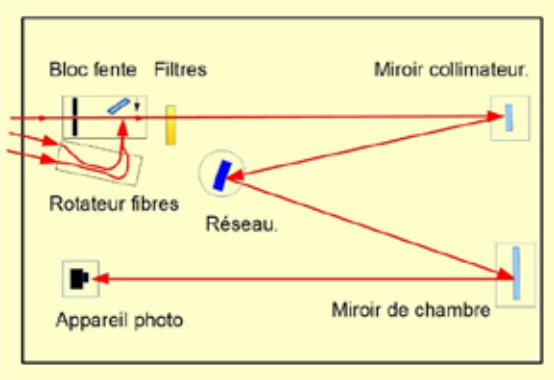


Fig.4. *Schéma du spectrographe SHARMOR.*

Suivant le parcours de la lumière, il comporte comme éléments principaux (figure 4) une fente ou un rotateur à fibres, une roue à filtres à bande étroite, un miroir collimateur de diamètre D = 286 mm et distance focale F = 7 380 mm, un réseau de diffraction, un miroir de chambre de D = 461 mm et F = 7 400 mm et un appareil photo numérique avec un capteur CMOS comportant 5 472 × 3 648 pixels carrés de 6,5 µm. Le chemin optique entre la fente (rotateur) et le capteur est d'environ 28 mètres. Le tout est enfermé dans un grand caisson étanche à la lumière (figure 5).

Fig.5. *Vue du caisson qui enferme le spectrographe SHARMOR, et qui affiche sur un panneau latéral un spectre du Soleil de 8 m de long. La porte située en bas à gauche de l'image montre la taille de ce spectre.*

Le rotateur à fibres sert à capter simultanément la lumière aux deux bords du limbe solaire et à la

4 https://saintveran-maisondusoleil.com

transmettre à l'intérieur du spectrographe (figure 6). Il se compose essentiellement d'un écran sur lequel se projette l'image du Soleil et de deux faisceaux de fibres optiques f_1 et f_2. Ces deux faisceaux sont séparés sur l'écran de D_f = 96 mm. Comme l'inclinaison de l'équateur du Soleil par rapport à l'horizon terrestre varie au cours de l'année, cet ensemble peut tourner sur un axe perpendiculaire à l'écran. Dans la configuration actuelle, ce réglage se fait manuellement.

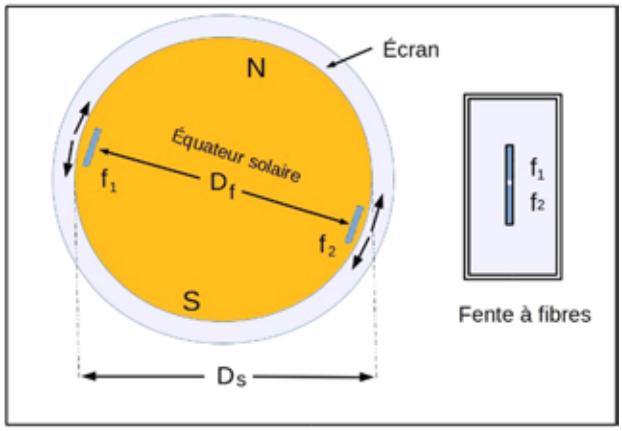


Fig.6. *Schéma du rotateur à fibres (voir texte).*

À l'autre extrémité des fibres et à l'intérieur du bloc fente, celles-ci sont placées bout à bout pour former une fente à fibres.

Le réseau de diffraction est la pièce maîtresse du spectrographe. La surface gravée mesure 204 mm par 408 mm, avec une densité de d = 316 traits⁄mm. Ce réseau est *blazé* (voir plus loin) à un angle θ_B = 63,4°. Le pilotage du spectrographe demande le positionnement du réseau dans un angle très précis (± 0,05°). Un programme informatique spécifique écrit en Python a été développé pour le pilotage du moteur pas à pas qui assure ce positionnement.

Rappels sur la physique du réseau de diffraction

L'équation fondamentale du réseau de diffraction s'écrit $n\lambda=(\sin\alpha+\sin\beta)/d$, ou n est l'ordre d'interférence du spectre, α et β respectivement les angles d'incidence et d'émergence des rayons par rapport à la normale au réseau et d la densité de traits (figure 7). Dans la configuration du SHARMOR, α et β sont très proches (la distance entre les centres des deux miroirs est très faible par rapport à leur distance focale) et l'équation peut se réécrire comme $\theta = \arcsin(dn\lambda/2)$ avec θ = α = β (configuration dite de Littrow). On remarque que les spectres correspondant aux différents ordres se superposent, d'où la nécessité d'intercaler des filtres à bande étroite pour sélectionner une longueur d'onde particulière.

L'angle de blaze θ_B est l'angle formé par la partie réflective des sillons avec le plan du réseau.

Il est choisi de manière à envoyer un maximum de l'énergie diffractée dans un ordre d'interférence donné. Cet ordre dépend de la longueur d'onde choisie.

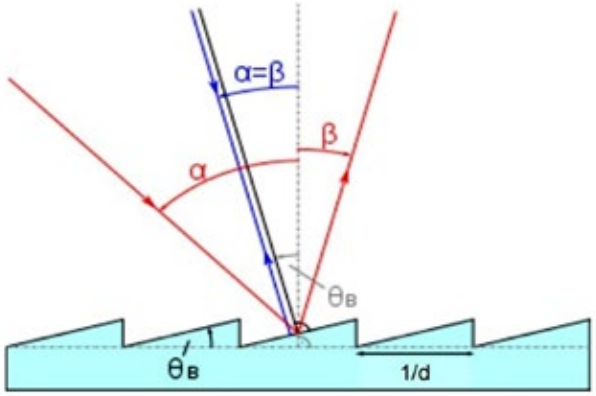


Fig.7. *Réseau blazé. Cas général (rayons en rouge) ; configuration Littrow (id. en bleu).*

Mesure du décalage Doppler

La résolution théorique d'un spectrographe est donnée par R = N × n, ou N est le nombre de traits qui sont éclairés sur la surface du réseau. Avec les données instrumentales indiquées plus haut, la résolution théorique du SHARMOR est de l'ordre de R = 10^6 et donc bien adaptée à notre projet.

L'expérience commence par le positionnement optimal des fibres sur l'image du Soleil. On procède ensuite à l'ajustement de l'angle d'incidence sur le réseau. Nous avons choisi de travailler sur le spectre d'ordre n = 9, qui fournit pour la longueur d'onde du doublet du sodium l'angle d'incidence le plus proche de l'angle de blaze. Un filtre de 10 nm de bande passante centré sur 590 nm est automatiquement positionné après le bloc fente (figure 4). La prise de vue d'images spectrales s'effectue ensuite, avec des poses de l'ordre de la fraction de seconde (figure 8).

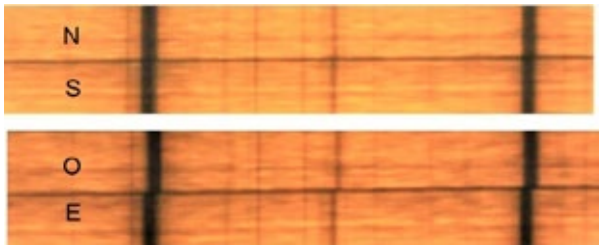


Fig.8*. Images spectrales du doublet du sodium. Fibres positionnées sur les pôles Nord et Sud du Soleil (haut), et sur les limbes Ouest et Est à l'équateur du Soleil (bas).*

Avec la configuration décrite plus haut, le doublet du sodium occupe la quasi totalité du champ de l'image

photographique. De cette image, on extrait le profil spectral (figure 9) et on procède ensuite à son étalonnage en longueur d'onde, utilisant l'écartement bien connu (0,5970 nm) des deux raies du doublet du sodium. La dispersion trouvée est de $1{,}780 \times 10^{-4}$ nm par pixel.

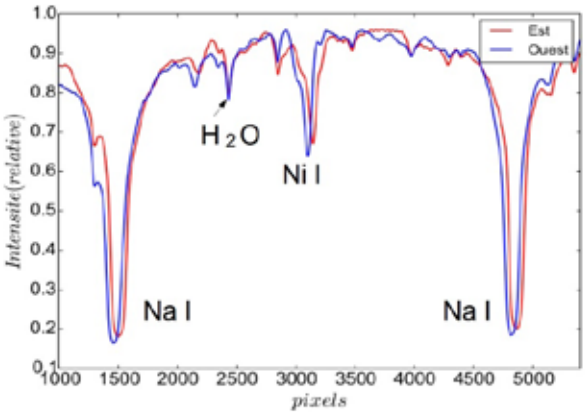


Fig.9. *Profil spectral du doublet du sodium. Fibre sur limbe équateur Est (rouge) ; idem Ouest (bleu).*

Sur la figure 9, on observe clairement le décalage sur les deux raies du doublet. Par ailleurs, on remarque plusieurs autres raies plus fines et moins intenses. Certaines de ces raies ne montrent pas de décalage, car elles résultent de l'absorption de la lumière solaire par l'atmosphère terrestre. Pour la mesure du décalage Doppler nous avons utilisé la raie du Ni I qui se trouve à 589,288 nm[5].

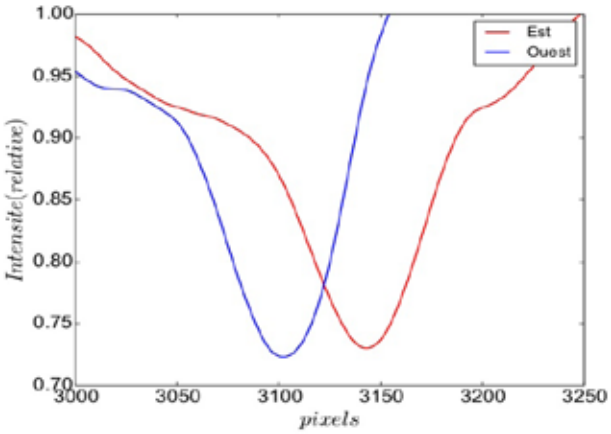


Fig.10. *Profil spectral de la raie du Ni I. Fibre Est (rouge) et fibre Ouest (bleu).*

Prenant les minima des deux pics, on mesure un décalage de 41 pixels (figure 10), ce qui, traduit en longueur d'onde, correspond à $7{,}31 \cdot 10^{-3}$ nm et en vitesse à v_{obs} =1,85 km/s. L'incertitude est de l'ordre de ± 0,06 km/s (1 pixel).

5 The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å Monograph 61 National Bureau of Standards USA.

Cette vitesse doit être corrigée d'un biais instrumental. Le diamètre du disque solaire projeté sur la platine d'entrée du rotateur à fibres était le jour de l'observation (le 7 juin 2017) de D_s = 108 mm. Comme les fibres f_1 et f_2 sont distantes de D_f = 96 mm nous devons corriger cette valeur d'un facteur D_s/D_f = 1,09. Appliquant cette correction, on obtient pour vitesse de rotation du Soleil à l'équateur de v_s = 2,02 ± 0,06 km/s. Par ailleurs, la vitesse observée sur Terre est la composante radiale de v_s, $v_{obs} = v_s \times sin(i)$, où i est l'angle formé par la ligne de visée Terre-Soleil avec l'axe de rotation du Soleil. Cet axe est incliné de 7,25° par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique. La Terre ne se trouve sur le plan de rotation du Soleil que deux fois par an, vers la fin de la première semaine de juin, et six mois plus tard, vers la fin de la première semaine de décembre. À la date de notre observation, cette correction est donc négligeable.

La valeur de v_s = 2,02 ± 0,06 km/s est très proche de celles que l'on trouve dans la littérature récente.

Par exemple, T = 450 nH_z = 25,3 jours et v_s = 2,01 km/s, sur le site indiqué note 3 page 12.

Remarques finales

Une extension naturelle de cette expérience Doppler faite avec le SHARMOR, serait la mesure des décalages à des latitudes solaires plus élevées. Ou encore la mesure de décalages pour d'autres raies, comme par exemple la raie *d'émission chromosphérique* de l'hélium, qui se trouve à λ = 587,6 nm. La Maison du Soleil doit être, par vocation, ouverte à toute proposition d'expérience qui puisse exploiter les capacités de cet instrument exceptionnel qu'est le SHARMOR.

L'auteur remercie Norbert Champion, Paul Felenbok et Jean Guérin, membres de l'Observatoire de Paris-Meudon, avec lesquels il a participé à la mise en place du spectrographe et à la réalisation de cette expérience.

■

Cette belle expérience nous a donné l'idée d'en faire un exercice utilisable en classe, que vous trouverez page suivante.

Une mesure originale de la distance du Soleil

Comme tous les astres, le Soleil tourne sur lui-même. Il existe deux manières de s'en apercevoir, par l'observation des taches solaires ou par la spectroscopie. Ces deux méthodes permettent de déterminer un ordre de grandeur de la distance du Soleil.

Première partie, la spectroscopie

Lorsqu'on vise le Soleil avec un spectroscope, on observe des raies d'absorption dans son spectre. Si on vise plus précisément deux points E et O de l'équateur solaire (figure 1), on remarque que les raies d'absorption sont décalées par effet Doppler-Fizeau (figure 2).

Fig.1. *Le Soleil et la Terre vus depuis un point situé au-dessus du pôle Nord du Soleil. Le point E situé sur l'équateur du Soleil (côté est) s'approche alors que O (côté ouest) s'éloigne. On suppose ici que la Terre est dans le plan de l'équateur solaire.*

Fig.2*. Images spectrales du doublet du sodium. En haut, le spectre obtenu en visant le point O est décalé vers le rouge alors qu'il est décalé vers le bleu pour le point E.*

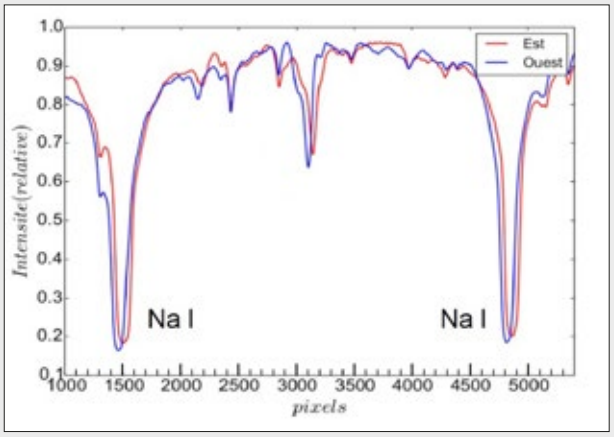


Fig.3. *Le spectre de la figure 2 sous forme de courbe d'intensité lumineuse. Les deux raies du sodium sont les plus sombres.*

Les longueurs d'onde du doublet du sodium sont 589,592 nm et 588,995 nm.

1. Déterminer l'échelle du graphique 3 en nm/pixel.

2. Identifier sur la figure 3 le nickel sachant qu'une des raies d'absorption est à 589,288 nm.

3. Mesurer sur la figure 4 le décalage sur la raie du nickel en pixels puis convertir en nm de longueur d'onde.

4. En déduire la différence de vitesse entre les points E et O. On rappelle la formule de l'effet Doppler-Fizeau :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

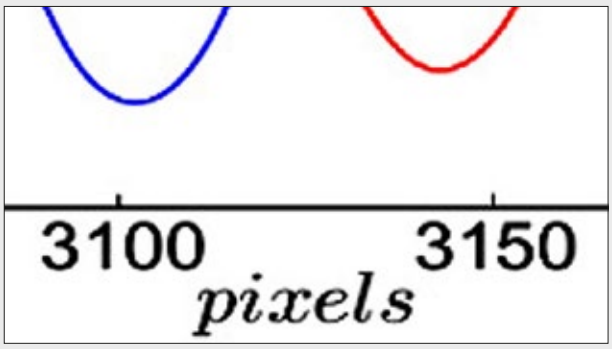


Fig.4. *Agrandissement de la figure 3 pour la raie du nickel, avec ici, une échelle de 1 mm pour chaque pixel du spectre.*

Le spectroscope ne visant pas exactement les extrémités d'un diamètre solaire, il conviendra de multiplier par 1,09 le résultat obtenu avec la formule ci-dessus.
En déduire V_1 en km/s (penser à diviser par 2).

Question supplémentaire

Expliquer pourquoi l'une des raies d'absorption n'est pas décalée sur la figure 3. On pourra mesurer sa longueur d'onde et l'identifier en cherchant sur Internet *The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å*.

Deuxième partie, les taches solaires

Si on observe le Soleil avec un filtre adapté, on peut voir des taches sombres à sa surface. Ces taches se déplacent de jour en jour, ce qui a permis dès le début du 17e siècle de comprendre que le Soleil tourne sur lui-même.

La période varie en fonction de la latitude des taches, elle est plus longue vers les pôles (plus de 30 jours) qu'au niveau de l'équateur (environ 26 jours).

5. On appelle R le rayon du Soleil. On demande de calculer la vitesse V_1 de la figure 1 en fonction de R, sachant que la période de rotation est de 26 jours.

Troisième partie, la conclusion

6. Calculer le rayon du Soleil à partir des deux réponses précédentes.

7. Depuis la Terre, on observe un diamètre solaire sous un angle de 0,53°. En déduire la distance du Soleil.

Les résultats

1. 0,00017768 nm/pixel
3. 0,0073 nm
4. v : 3,7 km/s et $V_1 = v \cdot 1{,}09/2$ soit 2,04 km/s

Question supplémentaire : H_2O (dans l'atmosphère terrestre)

5. $2\pi R/(25 \cdot 24 \cdot 3600)$
6. 703 000 km
7. 152 000 000 km pour la distance du Soleil

Le concept de vitesse, d'Aristote à Einstein

Pierre Magnien

Une vaste fresque historique décrit la lente émergence du concept de vitesse avec initialement la vision d'Aristote reposant sur l'observation et la réflexion, puis beaucoup tard, sur une conception qui se mathématise avec Galilée et Newton pour déboucher actuellement sur une perception totalement nouvelle du monde physique avec la relativité d'Einstein.

Il est courant de faire débuter la physique moderne avec l'œuvre de **Galilée** (1564 - 1642). Personne ne peut cependant ignorer qu'il avait été précédé par de nombreux philosophes ayant dégagé lentement et avec de nombreuses difficultés le chemin tortueux aboutissant aux principes et lois du mouvement que nous connaissons et utilisons aujourd'hui. Comme nous allons le voir, ce chemin débute en Grèce au VIe siècle av. J.-C.

La cinématique grecque

Rappelons tout d'abord que les premiers philosophes grecs[1] développant une réflexion sur la nature dégagée des mythes originels sont presque tous originaires de la grande Grèce et non pas de la Grèce du Péloponnèse.

- Ionie : **Anaximandre** (né vers -610), **Thalès de Millet** (né vers -625), **Pythagore** (né vers -580), **Héraclite** (né vers -540) ;
- Sicile : **Empédocle** (né vers -480) ;
- Italie du Sud : **Parménide** (né vers -510), **Zénon d'Élée** (né vers -500) ;
- Thrace : **Leucippe** (né vers -460), **Démocrite** (né vers -460).

Leur objectif fondamental était de « saisir dans le fond des réalités physiques ce qui pouvait expliquer les apparences, tentant d'unifier en un tout intelligible la multiplicité des phénomènes que leur curiosité rencontrait[2] ». Ils tenaient donc avant tout un discours non hiérarchisé sur la nature, dans lequel les dieux étaient absents et avec comme objectif de remonter aux principes premiers.

Mais, à l'aube du IVe siècle av. J.-C., Platon (-426, -346), disciple de Socrate (-470, -399), va renouveler les approches précédentes et inscrire l'homme dans un monde hiérarchisé dominé par des objets spirituels éternels et immuables : les Idées. Ces dernières, que l'on ne peut ni voir ni toucher, permettent seules un rapport complet au réel. La physique platonicienne va donc chercher à faire correspondre notre monde visible et changeant à un modèle éternel et intelligible grâce, en particulier, aux mathématiques qui sont alors un instrument de contemplation, stade suprême de la connaissance. Dans cette perspective, l'observation, et encore moins l'expérimentation, ne peuvent permettre de parvenir à cette approche ultime.

Aristote (-383, -321), élève de Platon, se démarque très tôt de son maître en affirmant que la connaissance se développe à partir des sensations. Ses outils essentiels sont l'observation – il n'expérimentera que très rarement – et la réflexion. Il va tout d'abord ajouter aux quatre éléments – Terre, Eau, Air et Feu – déjà admis par Empédocle, quatre qualités : le Chaud, le Froid, l'Humide et le Sec. Il associe ensuite chaque élément à deux qualités : Terre ↔ Froid & Sec, Eau ↔ Froid & Humide, Air ↔ Chaud & Humide, Feu ↔ Chaud & Sec. En s'appuyant sur des raisonnements que nous avons du mal à suivre aujourd'hui, il parvient à expliquer l'ébullition de l'eau (indiquons ici que la substance banale « eau » ne doit pas être confondue avec l'élément fondamental « Eau ») : de son état initial froid et humide, elle passe à un état chaud et humide, c'est à dire de l'air. Il y a eu vaporisation.

Dans le cadre de sa physique, Aristote va introduire deux types de mouvement pour expliquer le déplacement des objets. Le premier dit « mouvement naturel » correspond au « retour » non contraint d'un objet vers le lieu naturel de ses éléments constitutifs dominant : le centre de la Terre pour les objets dont les principaux éléments associés sont « Terre » et « Eau », le ciel pour ceux où les éléments essentiels sont « Air » et « Feu ». La chute d'un objet lourd que l'on lâche constitue dans cette perspective l'exemple type de ce mouvement.

Comment se déroule un tel mouvement ? Pour Aristote, le corps prenait « immédiatement » une

1 On les appelle en général « philosophes présocratiques ».
2 La philosophie antique par JP Dumont page 25 - Que sais-je ? n° 250 (dixième édition).

vitesse constante qui dépendait de son poids – à cette époque une telle notion recouvrait simplement l'idée de lourdeur – et se déplaçait verticalement. L'observation sur laquelle il basait cette affirmation était que la pierre que l'on lâche tombe beaucoup plus vite que la feuille plus légère. En effet une pierre contenait essentiellement l'élément « Terre » et avait donc « hâte » de retourner à son lieu naturel, le centre de la Terre. D'autres facteurs pouvaient d'ailleurs jouer : Aristote décida que seule la résistance que le milieu opposait au mouvement devait entrer en ligne de compte. Il aboutit finalement à une idée que l'on pourrait aujourd'hui formuler en affirmant que la vitesse prise par un corps en chute libre est proportionnelle à son poids et inversement proportionnelle à la résistance du milieu. Cette conclusion lui permit alors d'en déduire que le vide ne pouvait pas exister puisque dans ce cas la résistance du milieu deviendrait nulle et la vitesse infinie, ce qui est, pour lui, impossible (rappelons que les Grecs avaient avec l'infini des relations difficiles !).

Aristote distingue ensuite le « mouvement contraint ou forcé » qui se produit lorsque le corps est propulsé par des forces extérieures qui tendent à s'opposer à son mouvement naturel. Il donne comme exemple le lancement d'une pierre ou le tir d'une flèche. La vitesse dans ce cas augmente avec l'importance de la force et lorsque la force cesse d'être appliquée, le mouvement redevient naturel. La difficulté est alors que, lorsque le contact avec le dispositif propulseur cesse, le mouvement devrait devenir brutalement vertical, contrairement à ce que l'on observe. Aristote s'en tire en donnant à l'air un rôle moteur qui prolonge l'effet de la force initiale en supposant que l'air, résistant, qui est chassé « devant » le projectile passe « derrière » ce dernier et devient moteur !! Il est difficile de croire qu'Aristote ait pu lui-même être convaincu par ses propres affirmations !

Dans cette perspective d'explication du mouvement, les seuls points ayant une importance pour les péripatéticiens[3] sont l'**état initial** (position de départ) et l'**état final** (position d'arrivée) entre lesquels va se produire éventuellement un changement. Ceci n'entraîne pas une discontinuité du mouvement mais la trajectoire suivie et la quantification des paramètres, comme la vitesse, n'ont qu'une importance secondaire. La théorie se borne à analyser les **états** observables dans le système étudié et les variations de la vitesse **au cours** du déplacement ne sont même pas envisagées. Seules présentent un intérêt les différentes vitesses possibles selon le poids de l'objet et la résistance du milieu, là encore envisagées comme des **états**. La loi du mouvement en fonction du temps, dans ces conditions, n'est même pas pensable et il n'y a aucun intérêt pour Aristote à chercher une description de la position du corps à chaque instant du déplacement.

Aristote s'intéresse également au concept de « temps » qui est intimement lié à celui de « mouvement ». Chez ce philosophe, ce dernier doit être compris d'une manière beaucoup plus large que celle que nous lui donnons habituellement aujourd'hui. L'idée de mouvement doit donc être rapprochée de celle de changement et, chez Aristote, la physique est la science étudiant les qualités sensibles – observables – et leur « mouvement » c'est à dire, pour nous, leur changement. C'est alors avant tout une science des états. Dans cette perspective le temps, qui est pourtant rangé dans les grandeurs dénombrables[4] et mesure l'avant, le présent et l'après, existe cependant essentiellement comme une « qualité ». Ce temps aristotélicien suit d'ailleurs la vision dualiste de l'Univers : dans le Cosmos – monde au delà de la Lune – existe un temps éternel, sans début ni fin, rythmé par des cycles (diurne, annuel, etc.) revenant sans altération et dont la mesure est dénombrable en unité de base, le jour ; dans le monde sublunaire s'écoule un temps « dégradé » qui n'est que l'expression du changement et de la corruption. Sa connaissance en terme quantitatif n'a qu'une importance secondaire, d'ordre pratique.

L'époque pré–galiléenne

Les Romains ont peu apporté dans le domaine qui nous intéresse ici et après la chute de l'Empire et l'implantation durable du christianisme dans nos sociétés, c'est la vision platonicienne, après adaptation, qui va s'imposer : saint Augustin, par exemple, fait du monde dans lequel nous vivons un reflet de celui des Idées qui s'identifie lui-même avec la Parole Divine. Il faut attendre le XIIe siècle pour voir apparaître une évolution importante qui va modifier la vie intellectuelle en Europe occidentale. Les clercs vont alors découvrir – ou plutôt redécouvrir – la pensée grecque d'Aristote à travers les échanges qui vont s'établir avec le monde arabe. Ce dernier, depuis le VIIe siècle, s'est étendu sur d'immenses territoires qui vont de l'Espagne au voisinage de l'Inde. De puissants états se sont constitués et ont encouragé la récupération, la traduction et l'approfondissement des ouvrages des auteurs grecs.

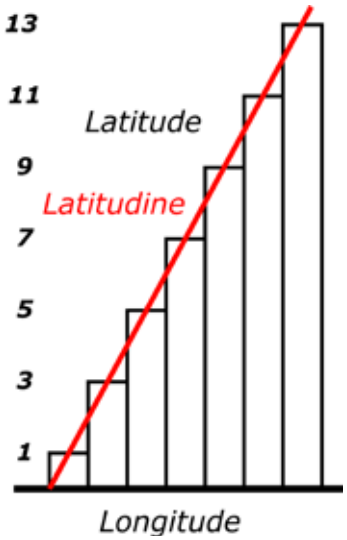
De nombreux intellectuels arabes vont alors s'appuyer sur ce corpus considérable pour faire progresser les connaissances dans de nombreux domaines. Les nombreux échanges qui vont ensuite s'établir entre le monde arabe et le monde chrétien vont faire connaître en Europe des idées nouvelles qui vont apporter un changement considérable des mentalités. De plus, les Arabes ont considérablement

3 Ce sont les adeptes des idées aristotéliciennes.

4 Les mouvements célestes, par exemple, étaient déjà associés à des grandeurs numériques comme le jour ou l'année.

développé les mathématiques grecques et inventé de nouvelles branches, en particulier l'algèbre. Longtemps après Pythagore, les nombres reprennent en science une place qu'ils ne quitteront plus mais en abandonnant leur « dimension » mystique. Aux XIIe et XIIIe siècles, apparaît alors le besoin de quantifier les qualités en repérant leur « intensité » par des nombres. Ce mariage entre les qualités d'Aristote et l'algèbre des arabes va conduire à une cinématique des proportions car on ne peut imaginer manipuler que des nombres sans dimension : on pourra parler d'une distance deux fois plus grande qu'une autre, d'une durée trois fois plus petite qu'une seconde. Chaque fois, ce qui est pris en compte, c'est le rapport de deux grandeurs de même nature mais il n'est pas pensable de faire le rapport d'une distance et d'une durée. Un tel objet n'a aucune signification pour les contemporains de cette époque.

La physique médiévale – contrairement à la cosmologie – se détachait donc déjà de la vision aristotélicienne mais conservait encore les grands principes de ce système. Une telle évolution va stimuler les réflexions de plusieurs maîtres de l'Université de Paris, en particulier **Jean Buridan** (v. 1300 - v. 1365) et son disciple **Nicolas Oresme** (v. 1320 - 1382). En utilisant une approche graphique et géométrique mise au point par les maîtres du collège Merton d'Oxford en Angleterre, ils se lancent dans l'étude des différents mouvements : le mouvement uniforme (vitesse constante) et le mouvement difforme (vitesse variable). Ils considèrent que le mouvement est la conséquence d'une qualité[5] possédée par les objets, la vitesse. Pour représenter le « devenir » de cette dernière, Oresme va alors utiliser le graphique ci-contre à deux dimensions : l'axe horizontal ou longitude représente une « extension » de la qualité temps. En des points répartis régulièrement le long de la longitude, il porte des segments verticaux, les latitudes, qui expriment l'intensité de la qualité vitesse. En joignant les extrémités de deux latitudes successives par un segment, appelé latitudine, il obtient une visualisation de la variation élémentaire de la vitesse. Si les latitudes sont de même longueur, le mouvement étudié est uniforme. Dans le cas où les extrémités des latitudes sont alignées et forment l'hypoténuse d'un triangle rectangle, on a affaire à un mouvement « uniformément difforme » comme on peut le voir sur la figure précédente. Cette représentation graphique permet de comprendre plus facilement les propriétés de la qualité vitesse.



Oresme démontre alors géométriquement la règle des maîtres de Merton : « **Toute qualité uniformément difforme a la même quantité totale que si elle affectait uniformément le sujet selon le degré de son point milieu** ». Cela signifie que la quantité de la qualité vitesse – qui pour nous est maintenant une distance – a pour mesure la surface formée par les latitudes successives pendant une extension donnée, ici la durée. On comprend rapidement que la surface du triangle représentant la quantité de vitesse uniformément difforme est égale à celle du rectangle représentant la quantité de vitesse uniforme de même extension – c'est à dire sur une même durée – et d'intensité égale à celle que nous appelons aujourd'hui la vitesse moyenne.

Le diagramme d'Oresme « contient » pratiquement les lois de Galilée sur le mouvement uniformément accéléré, la vitesse variant linéairement avec le temps. On peut se demander pourquoi Oresme n'a pas franchi le pas et énoncé la dépendance entre la distance parcourue et le carré du temps. On peut déjà remarquer qu'il n'a nulle part dans son œuvre identifié la quantité de vitesse à la distance parcourue. Il a cependant énoncé que, dans le cas d'une qualité uniformément difforme avec un axe de longitude régulièrement divisé, les qualités successives produites par cette division seront comme la série des nombres impairs.

Ce travail « inachevé » laisse perplexe et nous amène immanquablement à nous poser la question suivante : pourquoi a-t-il fallu attendre Galilée pour que le dernier pas nécessaire à l'obtention correcte de la loi du mouvement uniformément varié soit franchi ? Il est difficile d'y répondre. Il semble cependant que la principale difficulté ait résidé dans la conception et l'utilisation de la qualité vitesse. La règle de Merton nous fait bien sûr penser à la notion moderne de vitesse moyenne mais on ne doit pas penser que c'était le cas au XIVe et XVe siècle car les maîtres de cette époque travaillaient exclusivement sur des proportions, c'est à dire des rapports de grandeur de même espèce. Il n'était pas concevable de raisonner sur des rapports de type longueur sur temps. C'est peut-être là un des points de blocage qui a empêché Oresme de faire le dernier pas.

5 Le concept de qualité et l'étude de ses changements peut s'appliquer pour Oresme et ses collègues à toute caractéristique d'un objet évoluant dans le temps ; c'est ainsi que la température, la couleur… pourront être traitées de la même façon que la vitesse.

L'étude cinématique du mouvement chez Galilée

Les intellectuels du collège Merton d'Oxford, Jean Buridan et Nicolas Oresme, avaient étudié l'évolution de la « qualité » vitesse d'un objet comme un exercice de géométrie en concluant que c'était de cette manière que devait se comporter un corps en chute libre. Il n'était pas du tout question de rechercher une loi quantitative de ce mouvement exprimant la distance parcourue en fonction du temps. On avait alors toujours une vision « globale » du mouvement et de ses propriétés.

Galileo Galilei dit Galilée[6] (1564-1642) va inverser l'approche précédente. Tout d'abord, à partir d'observations et d'expériences, il va remettre en cause trois « certitudes » des physiciens aristotéliciens en affirmant que :

Sur le plan cinématique

- L'état de repos et l'état de mouvement ne sont pas fondamentalement différents.
- Nous ne pouvons donc pas vérifier cette différence en observant la vitesse des objets en mouvement, cette différence n'étant qu'une question de point de vue.

Sur le plan dynamique

- Le déplacement d'un objet dans l'espace ne nécessite pas de force qui le pousserait et le maintiendrait en mouvement[7].

L'étude expérimentale du mouvement de chute ralentie sur un plan incliné va permettre à Galilée de vérifier et de renforcer ces trois nouvelles affirmations et de donner naissance à une mécanique du point pesant en mouvement dans un champ gravitationnel constant[8]. Pour cela il faut effectuer des mesures et, en particulier, celles concernant la vitesse. Il faut alors définir préalablement ce que l'on va rechercher. Aujourd'hui personne n'a de difficulté pour écrire la formule v = **dl/dt** (vitesse définie comme la dérivée de la distance parcourue en fonction du temps) mais Galilée, comme ses prédécesseurs, ne possédait pas les mathématiques pour écrire cette simple égalité par contre il maîtrisait la géométrie et la loi des proportions énoncées par Euclide, déjà mises en œuvre par Oresme. Cependant il dépasse clairement ses prédécesseurs en considérant la vitesse d'un tel mouvement non plus comme ayant simplement une « intensité » croissant régulièrement mais comme la composition par addition d'accroissements élémentaires qu'il appelle dans son ouvrage « moment de vitesse ». Il fait enfin du temps une quantité continue que l'on peut diviser en éléments aussi petits que l'on veut. À partir de là, il peut « définir » l'accélération instantanée comme une quantité exprimant la croissance de la vitesse durant chaque partie successive aussi petite qu'on le souhaite. Cette forme de « passage à la limite » lui permet de remplacer le diagramme en escalier des intellectuels du XIVe siècle par une ligne droite, dont il détermine expérimentalement quelques points, lui permettant de remonter à la loi que nous connaissons et exprimant la proportionnalité entre la distance parcourue et le carré du temps.

Galilée va également détruire la différence, irréductible dans le modèle aristotélicien, entre le mouvement et le repos. Ils perdent chacun leur caractère absolu : pour le second en particulier ce n'est plus un état auquel parviennent les objets lorsqu'ils ont rejoint leur lieu naturel mais il doit se comprendre comme une absence de modification dans les relations spatiales entre les choses. Dans cette perspective il devient relatif et l'on peut dire que le repos est un mouvement qu'une modification de point de vue a annulé. Galilée, dans la deuxième journée de son ouvrage *Dialogue* concernant les deux plus grands systèmes du monde écrit : « Ainsi, les marchandises dont un navire est chargé se **meuvent en tant que, quittant Venise, elles passent par Corfou, par la Crète, par Chypre, et vont à Alep (...) mais, pour ce qui concerne les balles, caisses et autres colis dont le navire est rempli et chargé, et respectivement au navire lui-même, le mouvement de Venise en Syrie est comme nul et ne modifie en rien la relation qui existe entre eux, cela parce qu'il est commun à eux tous et que tous y participent** ». Étant en mouvement par rapport à son port d'attache, le chargement passe au repos si l'on se place d'un autre point de vue et que l'on considère celui d'un marin monté à bord du navire. Galilée peut donc ajouter « **Il est donc manifeste que le mouvement qui se trouve être commun à plusieurs mobiles est oiseux et comme nul, s'agissant des relations entre ces mobiles, parce que rien ne change entre eux…** ». On a ici un premier énoncé du principe de relativité[9] de la mécanique classique qui sera repris

6 Après la condamnation en 1633 de son ouvrage Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, Galilée se tourne vers la rédaction d'un traité consacré à la mécanique, et plus particulièrement à celle du mouvement de chute libre. Ce travail aboutit à la publication en 1638 de son dernier ouvrage Discours sur deux sciences nouvelles sur lequel nous nous appuyons pour cette partie de l'étude.

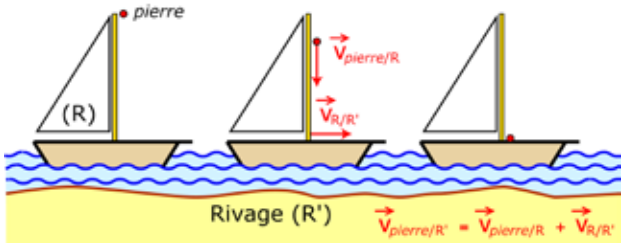
7 Ce n'est pas encore le principe d'inertie car, pour Galilée, la courbe suivie par un objet sur lequel n'agit aucune force résultante est un arc de cercle.

8 On pourra consulter le compte-rendu des travaux remarquables de Maurice Clavelin sur la question dans son excellent ouvrage *La philosophie naturelle de Galilée* paru chez Albin Michel (réédition de 1996). Il y montre clairement que l'essentiel de la science galiléenne est « le passage d'un univers conceptuel à un autre univers conceptuel ».

9 L'expression « principe de relativité » est de Henri Poincaré.

sous une forme plus rigoureuse par Newton et élargi à l'ensemble de la physique par Einstein. Il fait entrer dans le champ des études de mécanique le concept fondamental de référentiel[10]. Il s'agit d'un « objet » quelconque par rapport auquel on détermine les positions successives – donc le mouvement – du système que l'on souhaite étudier en attachant à cet objet un repère tridimensionnel et une référence temporelle.

Cette réflexion à propos de la diversité des points de vue avec lesquels on peut décrire le mouvement va amener Galilée à formuler ce que nous connaissons maintenant sous le nom de « composition des vitesses ». Comme souvent dans ses ouvrages, Galilée illustre son affirmation à l'aide d'un exemple que nous connaissons bien ; il s'agit de la pierre que l'on lâche depuis le sommet du mât d'un bateau. Va-t-elle tomber à son pied ou bien un peu en arrière – point de vue des aristotéliciens – en fonction de la vitesse du navire ? Il considère deux observateurs : le premier est immobile dans le référentiel du bateau et le second dans celui du rivage devant lequel se déplace le vaisseau.



À partir des réflexions précédentes, Galilée montre alors que, vue depuis le rivage, la pierre se déplace, avant d'être lâchée, à la vitesse du bateau. Du fait de « l'indélébilité » du mouvement uniforme, elle va la conserver par la suite, mais ce mouvement de translation horizontale uniforme se combinera alors avec celui de chute libre verticale. Cette composition des vitesses s'exprime aujourd'hui par la loi galiléenne d'addition des vitesses indiquée sur le schéma précédent.

Tous ces résultats vont être diffusés à travers les deux principaux ouvrages de Galilée : en 1632, paraît *Dialogue sur les deux systèmes du Monde* et en 1638 *Discours et démonstrations mathématiques à propos de deux sciences nouvelles*. Lus dans toute l'Europe, ce renouvellement profond des sciences de la nature va être diversement appréhendé. **René Descartes** (1596-1650), dans ces échanges épistolaires avec divers intellectuels du moment, montre qu'il n'a pas compris l'importance de ce qui est détaillé en particulier dans les *Discours* ; pour lui, Galilée s'est fourvoyé en recherchant des lois mathématiques décrivant le mouvement alors que l'essentiel est dans la recherche des « causes premières » prenant leur origine en Dieu. Pour lui, la seule quête qui vaille la peine est celle des règles métaphysiques permises par le Créateur du Monde.

Le triomphe de la mécanique classique chez Newton

Alors que pour Descartes la mécanique proposée par Galilée est une construction sans fondements, **Isaac Newton** (1643[11]-1727) va la faire fructifier en dépassant son approche purement cinématique[12] et va lui apporter une dynamique en identifiant les causes du mouvement et en proposant les lois auxquelles elles obéissent. Son ouvrage le plus important en relation avec notre sujet est *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publié en 1687 et connu sous le nom abrégé des *Principia*. Il y énonce, d'une part, la loi de la gravitation universelle qui unit « définitivement » les phénomènes terrestres et célestes et, d'autre part, les principes de base permettant d'étudier mathématiquement les mouvements après avoir défini les concepts fondateurs de force, de masse (grave et inertielle), d'espace et de temps (absolus et relatifs). Cet ensemble constituera le socle de la mécanique classique jusqu'au début du XXe siècle.

Cependant il est difficile aujourd'hui de lire les *Principia* car Newton n'y fait que très peu usage du calcul différentiel dont il est d'ailleurs à l'origine (méthode des fluxions) en concurrence avec **Gottfried Wilhelm Leibniz** (1646-1716) et avec lequel il entretiendra sur le sujet une querelle de priorité[13] pendant plusieurs années. Les démonstrations de son ouvrage s'appuient sur des méthodes de géométrie infinitésimale qui en rendent le texte presque illisible pour un lecteur d'aujourd'hui. Mais très vite après sa parution, le contenu des *Principia* va être réécrit sous la forme que nous connaissons et qui s'appuie sur la mise en œuvre des algorithmes du calcul intégro-différentiel que vont

10 Galilée n'est pas à l'origine du terme qui apparaît à la fin du XVIIe siècle et sera très largement utilisé en physique à partir de la seconde moitié du XIXe.

11 On lit très souvent que Newton est né l'année de la mort de Galilée. Bien que ce détail ne soit pas, en soi, d'une grande importance, il est faux ! La raison est cependant intéressante : Galilée est mort le 9 janvier 1642 et Newton est né le 25 décembre 1642. Il semble bien que nous soyons dans la même année mais ça n'est pas le cas car ces dates ne sont pas données dans le même calendrier : pour Galilée il s'agit déjà du calendrier grégorien, adopté en Italie en 1582, alors que pour Newton nous sommes encore dans le calendrier julien, l'Angleterre adoptant le premier en 1752. Si nous nous plaçons pour les deux savants dans le calendrier grégorien, Newton est né le 7 janvier 1643.

12 Rappelons ici que Galilée avait fait une avancée sur le plan de la dynamique en énonçant une première formulation du principe d'inertie.

13 Pour être précis, les échanges contradictoires se sont faits non pas entre Liebniz et Newton lui-même, mais avec un des amis de ce dernier, Samuel Clarke (1675 – 1729).

rapidement développer plusieurs mathématiciens comme **Jacques Bernouilli** (1654-1705), le marquis **Guillaume de l'Hospital** (1661-1704) et **Pierre Varignon** (1654-1722), ce dernier appliquant les nouvelles méthodes leibniziennes à la mécanique newtonienne. Le XVIIIe siècle verra le triomphe de la formulation que nous connaissons aujourd'hui avec des symboles tels que $dx, dt, \frac{d}{dt}, \frac{\partial}{\partial t}, \int$, qui permettent une véritable algébrisation de la cinématique et de la dynamique. L'aboutissement de cette démarche est contenu dans l'ouvrage de **Joseph Louis Lagrange** (1736-1813) *La mécanique analytique* qui, comme il le dit dans sa préface, « … expose des méthodes ne demandant ni raisonnements géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une marche régulière et uniforme ». La vitesse est devenue une grandeur définie mathématiquement d'une manière rigoureuse permettant sa manipulation sans difficulté. Toutes les discussions qui étaient apparues suite à la publication des *Principia* se sont alors éteintes devant la puissance prédictive de ces nouvelles méthodes qui vont s'imposer pendant un siècle et demi.

La révolution einsteinienne

Durant le XIXe siècle, plusieurs difficultés étaient apparues pour expliquer les résultats obtenus dans des expériences d'optique où intervenait la vitesse de la lumière. Dans le même temps, apparaissait la notion de champ et plusieurs savants remirent alors en cause l'idée newtonienne d'action instantanée à distance pour la remplacer par celle d'actions se propageant de proche en proche à vitesse finie. Ils vont aussi critiquer l'idée de simultanéité absolue entre des événements mais sans remettre en cause celle de temps absolu s'écoulant de la même façon en tout lieu de notre Univers. La question va recevoir en 1905 une réponse renouvelant complètement notre vision de la physique dans un article écrit par Albert Einstein *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*. **Son contenu montrait que le temps n'était plus un paramètre indépendant du référentiel d'étude** mais devenait une dimension supplémentaire au même titre que les dimensions spatiales, ce qui en faisait une grandeur « privative » attachée à chaque observateur. Les nouvelles transformations permettant de passer des coordonnées dans un repère attaché à un référentiel (**R**) à celles dans un repère attaché à un référentiel (**R'**) imbriquent les dépendances entre les coordonnées spatiales et la coordonnée temporelle.

De plus l'analyse d'Einstein montrait que, dans ces conditions, il apparaissait une constante fondamentale de structure notée c qui avait la dimension d'une vitesse et qu'on identifiait à la vitesse de la lumière dans le vide. Ceci ne pouvait qu'occasionner une mutation importante du concept de vitesse. Tout d'abord aucun objet pesant ne peut se déplacer à la vitesse c et, à plus forte raison, plus vite que c. Cette limite infranchissable oblige à revoir la loi d'additivité galiléenne des vitesses. Rappelons-la : si un objet A se déplace à la vitesse $v_{A/(R)}$ par rapport à un référentiel (**R**) qui lui même se déplace à la vitesse $v_{(R)/(R')}$ par rapport à un référentiel (**R'**), la loi galiléenne nous permet d'écrire (avec des vecteurs vitesse colinéaires) :

$$\boldsymbol{v}_{A/(R')} = \boldsymbol{v}_{A/(R)} + \boldsymbol{v}_{(R)/(R')}$$

On voit bien que si $v_{A/(R)} = \mathbf{c}$ et $v_{(R)/(R')} \neq 0$ on a alors $v_{A/(R')} > \mathbf{c}$ ce qui n'est pas autorisé. Il faut donc construire une nouvelle loi telle que si $v_{A/(R)} = \mathbf{c}$ on a alors $v_{A/(R')} = \mathbf{c}$. Celle proposée par Einstein est la suivante :

$$\boldsymbol{v}_{A/(R')} = \frac{\boldsymbol{v}_{A/(R)} + \boldsymbol{v}_{(R)/(R')}}{1 + \frac{\boldsymbol{v}_{A/(R)} \cdot \boldsymbol{v}_{(R)/(R')}}{\boldsymbol{c}^2}}$$

Enfin, en 1908, **Hermann Minkowski** (1864-1909) va donner à la relativité einsteinienne une formulation mathématique quadri-dimensionnelle permettant de définir la quadri-vitesse qui est la dérivée du quadri-vecteur position par rapport au temps propre[14] et dont la composante temporelle vaut $c \cdot \gamma(v)$[15]. Il n'est pas possible de développer plus avant cette question mais remarquons cependant que les trois composantes spatiales de la quadri-vitesse ont pour expression $\gamma \cdot v_i$, v_i représentant les composantes de la vitesse tridimensionnelle usuelle. On constate ici que la notion de vitesse, en relativité, se complexifie considérablement du fait que l'on est obligé de raisonner dans un espace quadri-dimensionnel.

En relativité restreinte, l'équivalence de tous les mouvements inertiels entraîne que la vitesse ordinaire perd de son intérêt pour exprimer les lois physiques. La relativité générale accentue plus encore ce « déclassement », car elle supprime toute distinction fondamentale entre les différents types de vitesses en les intégrant dans la structure de l'espace-temps. Une seule vitesse conserve un sens précis dans les deux théories : celle de la lumière, paramètre de liaison de l'espace et du temps mais sa constance n'a un sens global que pour la relativité restreinte car en relativité générale son caractère invariable n'est que local. ■

14 Le temps propre est celui mesuré par une horloge dans le référentiel qui lui est attaché.

15 La notation g(v) – g étant le facteur de Lorentz – indique que le facteur g de la relativité restreinte est attaché à un objet ayant une vitesse variable, la théorie pouvant traiter, contrairement à ce qu'on lit souvent, le cas de mouvement quelconque à condition de ne pas être en présence d'un champ gravitationnel, ce cas relevant alors de la relativité générale.

‘Oumuamua

Vitesses cosmiques et trajectoires

Béatrice Sandré

Comment a-t-on pu savoir que l’astéroïde ‘Oumuamua, découvert à l’automne dernier, venait de l’extérieur du Système solaire ? Une sonde peut-elle quitter ce même Système solaire ? Pour répondre à ces questions, Béatrice Sandré revient sur les notions d’énergie qui gouverne les mouvements.

Le 21 novembre 2017, Christian Larcher nous envoyait le message suivant :

« Tous les journaux en parlent et il est difficile de l’ignorer. Un astéroïde en forme de cigare d’environ 400 m de long pour environ 40 m de large est passé à 30 millions de km de la Terre à une vitesse estimée à 38 km/s soit environ 136 000 km/h. Cet objet fut d’abord pris pour une comète avant que l’on établisse qu’il s’agissait en fait d’un astéroïde venu d’un autre système planétaire que le nôtre. L’UAI l’a baptisé A/2017 U1. »

Fig.1. *‘Oumuamua, vue d’artiste.*

Nous allons tenter de montrer comment les résultats des observations prouvent que cet astéroïde n’appartient pas au Système solaire. Pour cela, nous rappellerons quelques lois de la mécanique auxquelles obéissent les mouvements des objets célestes. Nous les appliquerons dans un premier temps à un objet bien connu venant du Système solaire puisque envoyé depuis la Terre, la sonde Voyager 1. Nous étudierons ensuite le cas de l’astéroïde A/2017 U1.

Les lois de la mécanique appliquées aux objets célestes

En négligeant l’influence des planètes, selon les lois de Kepler, la trajectoire d’un objet se déplaçant dans le Système solaire est une conique dont le Soleil est un foyer. Elle peut être soit une ellipse, soit une branche d’hyperbole entourant le Soleil, avec le cas limite intermédiaire de la parabole.

Dans le premier cas, l’objet est et reste lié au Soleil ; il appartient au Système solaire.

Dans le deuxième cas, l’objet passe dans le Système solaire ; il vient d’ailleurs et repartira ailleurs.

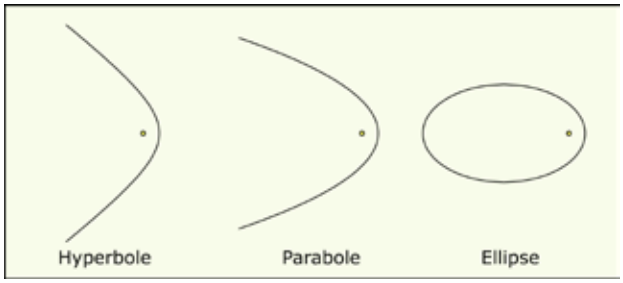


Fig. 2. *Les trois types de trajectoire d’un objet dans le Système solaire.*

Au cours de son mouvement dans le champ gravitationnel du Soleil, l’énergie mécanique de l’objet dans le référentiel héliocentrique Rs reste constante (voir encadré page suivante).

Son expression $E = \frac{1}{2}mV^2 - \frac{GmM_S}{r}$ montre que l’objet ne peut être à une distance infinie du Soleil que si son énergie mécanique est **positive**. Sa trajectoire est alors **hyperbolique**.

Si l’énergie mécanique de l’objet est **négative**, il ne peut s’éloigner infiniment du Soleil. Sa trajectoire est **elliptique**.

Dans le cas limite d’une énergie mécanique **nulle**, la trajectoire est **parabolique**.

La vitesse d’un objet et sa position dans le référentiel héliocentrique fixent la nature de sa trajectoire.

Énergie mécanique

Un point matériel de masse m, situé à la distance r du Soleil, se déplace à la vitesse V dans le **référentiel héliocentrique** Rs

Son énergie cinétique est $K = \frac{1}{2}mV^2$

Son énergie potentielle est $U = -\frac{GmM_S}{r}$ **en choisissant l'origine pour r infini** (voir encadré Énergie potentielle gravitationnelle).

Son énergie mécanique est E = U + K

E est une constante du mouvement si l'objet n'est soumis qu'à l'attraction gravitationnelle du Soleil.

M_S est la masse du Soleil ($M_S = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ kg)
G est la constante universelle de gravitation
($G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ u.S.I.)

Énergie potentielle gravitationnelle

Une force $\vec{F}$ dérive d'une énergie potentielle U si son travail lors d'un déplacement d'un point P à un point Q est indépendant du chemin suivi pour aller de P à Q. La variation d'énergie potentielle U_Q - U_P est par définition l'opposée du travail de la force se déplaçant de P à Q.

Pour un déplacement élémentaire, cette relation s'écrit :
$\vec{F}.d\vec{OP} = -dU$

Dans le cas de la force gravitationnelle, $\vec{F} = -\frac{GMm}{r^2}\vec{e_r}$

d'où $-dU = \frac{GMm}{r^2}dr$, $\frac{dU}{dr} = \frac{GMm}{r^2}$ et $U = -\frac{GMm}{r} + U_o$

Une énergie potentielle n'étant définie que par sa variation, elle ne peut être calculée qu'à **une constante additive près**. Uo est une constante qui dépend de l'origine choisie. Le plus souvent, l'énergie potentielle gravitationnelle est choisie nulle lorsque les masses M et m sont infiniment éloignées d'où

Uo = 0 et $U = -\frac{GMm}{r}$

Dans le cas particulier de la gravitation terrestre, l'énergie potentielle à une altitude h faible devant le rayon R_T de la Terre s'écrit :

$$U = -\frac{GMm}{R_T + h} + U_o = -\frac{GMm}{R_T}\left(1 + \frac{h}{R_T}\right)^{-1} + U_o$$

En négligeant les termes d'ordre 2 en $\frac{h}{R_T}$

$$U = -\frac{GMm}{R_T}\left(1 - \frac{h}{R_T}\right) + U_o$$

h étant supposé petit devant le rayon de la Terre, on ne peut plus choisir l'origine des énergies potentielles à l'infini. On la choisit cette fois à la surface de la Terre, pour h = 0,

et on retrouve la formule $U = +\frac{GMmh}{R_T^{\,2}} = mgh$

La sonde Voyager 1

La NASA fournit la courbe (figure 3) de la vitesse de la sonde Voyager 1 dans le référentiel du Soleil en fonction de sa distance au Soleil. Des courbes analogues peuvent être obtenues et étudiées pour bien d'autres sondes interplanétaires telles que Voyager 2 ou Cassini Huygens.

Lorsqu'une sonde est envoyée depuis la Terre vers d'autres planètes, elle doit dans un premier temps s'échapper de la gravitation terrestre. Dans le référentiel géocentrique R_T sa trajectoire doit être une branche d'hyperbole et son énergie mécanique positive.

Alors qu'elle se trouve à une distance du centre de la Terre égale à son rayon R_T = 6 400 km

sa vitesse v_o vérifie : $\frac{1}{2}mv_o^2 - \frac{GmM_T}{R_T} > 0$

où M_T est la masse de la Terre, de valeur $5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg.

$$v_o > v_e = \sqrt{\frac{2GM_T}{R_T}} = 11 \times 10^3 \, m/s$$

v_e est la vitesse d'évasion du champ de gravitation terrestre. C'est la vitesse minimale à laquelle la sonde doit être lancée pour quitter la sphère d'influence de la Terre (voir encadré) et ne pas prendre une trajectoire elliptique dans R_T. Le rayon de la sphère d'influence de la Terre est d'environ 0,01 u.a.

Sphère d'influence

La sphère d'influence de la Terre est la région de l'espace l'entourant à l'intérieur de laquelle la mise sur orbite d'un satellite terrestre est possible. Au-delà de cette sphère, le satellite sera progressivement capturé par le Soleil.

La Lune est donc à l'intérieur de la sphère d'influence de la Terre.
Le satellite SoHO est juste à la limite.

On montre que le rayon de la sphère d'influence d'une planète de masse m située à la distance a du Soleil est

$$r = a\sqrt[3]{\frac{m}{3M}}$$

On trouve ainsi que le rayon de la sphère d'influence de la Terre est de 0,01 u.a. tandis que celui de Jupiter est de 0,34 u.a.

En première approximation, on peut considérer qu'à l'intérieur de la sphère d'influence d'une planète, la gravitation solaire est négligeable et le référentiel planétocentrique est galiléen. À l'extérieur, la gravitation exercée par la planète est négligeable devant celle exercée par le Soleil.

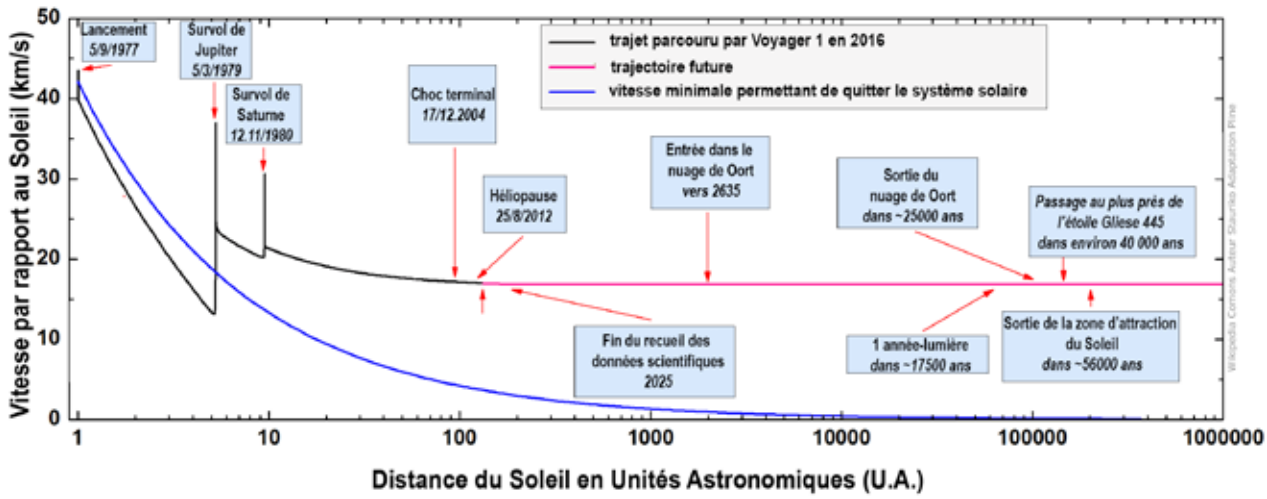


Fig.3. *Vitesse de la sonde Voyager 1 dans le référentiel héliocentrique.*

La sonde la quitte la sphère d'influence à une distance du Soleil très voisine de l'unité astronomique (entre 0,99 et 1,01 u.a.) avec une vitesse $\vec{v}_o$ par rapport à R_T. Elle entre alors dans la zone d'influence du Soleil avec une vitesse, dans le référentiel héliocentrique Rs : $\vec{V} = \vec{v}_o + \vec{v}_T$

$\vec{v}_T$ est la vitesse de la Terre par rapport au Soleil de valeur 30 km/s.

Ces deux vitesses s'ajoutent vectoriellement mais, si le lancement a été fait dans la « bonne » direction elles peuvent s'ajouter arithmétiquement.

La courbe nous montre que la sonde Voyager 1 avait une vitesse initiale de 40 km/s par rapport au Soleil. Il suffisait pour cela qu'elle quitte la sphère d'influence de la Terre en ayant une vitesse de 10 km/s par rapport à R_T, tangente à son orbite et dans le bon sens.

À une distance de 1 u.a. du Soleil et avec une vitesse de 40 km/s, on vérifiera aisément que l'énergie mécanique de Voyager 1 est négative.

On peut aussi comparer la vitesse de la sonde dans Rs à la vitesse d'évasion du Système solaire à cette distance de 150 millions de km :

$$V_e = \sqrt{\frac{2GM_S}{r}} = 42 \times 10^3 \, m/s > 40 \, km/s$$

La vitesse de la sonde est inférieure à la vitesse d'évasion. La trajectoire de la sonde dans Rs est bien elliptique.

Sur la figure 3, la courbe bleue est celle de la vitesse d'évasion du Système solaire en fonction de la distance au Soleil. Initialement, le point figurant la vitesse de Voyager 1 en fonction de sa position (en noir) est bien en dessous de cette courbe bleue.

Sa vitesse diminue ensuite « naturellement » lorsque Voyager 1 s'éloigne du Soleil.

La figure 3 nous montre qu'en arrivant au voisinage des planètes Jupiter et Saturne, la vitesse de la sonde augmente brutalement. C'est le phénomène d'assistance gravitationnelle expliqué sur la figure 4.

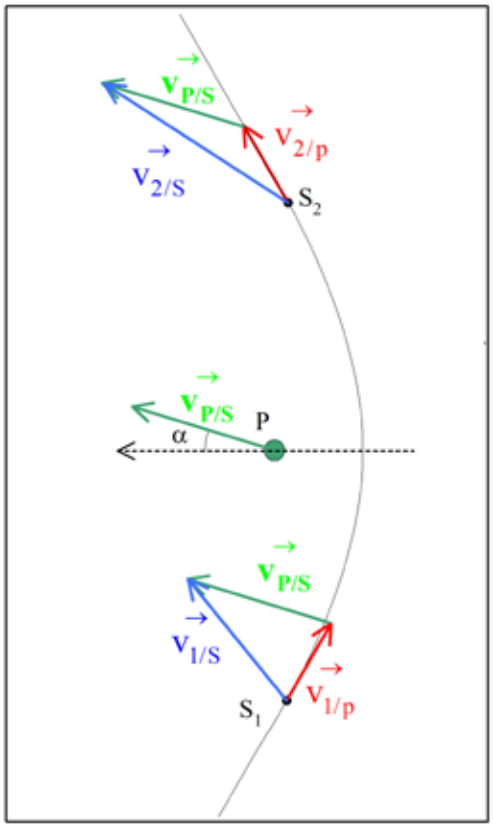


Fig.4. *Trajectoire hyperbolique de la sonde dans le référentiel R_p de la planète.*

Lorsque la sonde arrive en S_1 dans la sphère d'influence de la planète, sa vitesse dans le référentiel R_P lié à la planète P est

$$\vec{v}_{1/P} = \vec{v}_{1/S} - \vec{v}_{P/S}$$

où $\vec{v}_{1/S}$ est sa vitesse dans le référentiel Rs lié au Soleil et $\vec{v}_{P/S}$ la vitesse de la planète dans Rs. Elle décrit alors dans R_P une branche d'hyperbole entourant la planète. Sa vitesse dans R_P augmente fortement jusqu'au périhélie puis diminue jusqu'en S_2 où la sonde ressort de la zone d'influence de la planète. Entre S_1 et S_2, la vitesse de la sonde dans R_P a changé de direction mais a repris la même valeur. En S_2, la vitesse de la sonde par rapport au Soleil $\vec{v}_{2/S}$ est toujours la somme de sa vitesse $\vec{v}_{2/P}$ dans R_P et de la vitesse $\vec{v}_{P/S}$ de la planète dans R_S. Les directions relatives des deux vecteurs vitesse ne sont plus les mêmes et la vitesse de la sonde dans le référentiel du Soleil a changé de valeur. Si les directions sont bien choisies (l'angle α représenté sur la figure 4, entre l'axe de l'hyperbole et $\vec{v}_{P/S}$ doit être inférieur à 90°) la valeur de la vitesse peut augmenter ainsi que l'énergie mécanique de la sonde dans le référentiel R_S. On pourrait croire à une violation du principe de conservation de l'énergie mécanique. En réalité, l'énergie mécanique gagnée par la sonde lui vient de la planète mais la masse de la sonde étant négligeable devant celle de la planète, la perte d'énergie de cette dernière est indétectable.

C'est ainsi que la sonde Voyager 1 qui avait initialement une énergie mécanique négative dans R_S et ne devait donc pas quitter le Système solaire a pu accroître sa vitesse au passage de Jupiter puis de Saturne. La figure 3 montre qu'après le survol de Jupiter, la courbe noire de la vitesse de la sonde est passée au dessus de la courbe bleue. Son énergie mécanique est devenue positive et sa trajectoire dans R_S hyperbolique.

Voyager 1 est maintenant en route à 17 km/s soit 60 000 km/h vers les confins du Système solaire et s'en évadera dans quelque 50 000 ans.

L'astéroïde A/2017 U1

Il fut découvert le 19 octobre 2017 par le télescope automatique Pan-STARRS 1 situé sur le volcan Haleakalā à Hawaï. Il fut ensuite observé entre le 18 et le 29 octobre 2017.

Le message de Christian ne précisant pas la position de l'astéroïde par rapport au Soleil ni dans quel référentiel étaient mesurées les vitesses, nous prendrons les valeurs données dans l'article de Nature cité en référence.

Le 22 octobre par exemple, sa vitesse par rapport au Soleil était de 46,2 km/s alors qu'il en était à 1,22 u.a. Son énergie mécanique par unité de masse est :

$$\frac{E}{m} = +3,43 \times 10^8 \, J/kg$$

Elle est positive. L'astéroïde a une trajectoire hyperbolique et quittera le Système solaire. Lorsqu'il sera infiniment éloigné du Soleil, sa vitesse sera :

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2E}{m}} = 26,5 \times 10^3 \, m/s$$

Avant d'affirmer qu'il ne vient pas du Système solaire, il faut cependant vérifier que l'astéroïde n'a pas subi, telle la sonde Voyager 1, d'accélération en passant dans la sphère d'influence d'une planète. La détermination complète des caractéristiques de sa trajectoire montre que les seules planètes dont il s'est un peu approché sont Jupiter et la Terre.

Il est passé à 4,82 u.a. de Jupiter alors que sa sphère d'influence a un rayon de 0,34 u.a. et à 0,16 u.a. de la Terre alors que sa sphère d'influence a un rayon de 0,01 u.a. Ni Jupiter ni même la Terre n'ont pu accélérer cet astéroïde de façon significative.

L'astéroïde vient bien d'ailleurs et l'équipe du programme Pan-STARRS qui l'a découvert l'a surnommé « *'Oumuamua* » qui signifie en Hawaïen : *« messager venu de loin et arrivé le premier »*.

Référence : Nature 21 décembre 2017 « A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid » par K. Meech et al.

■

Fig.5. *L'une des deux sondes spatiales Voyager identiques. La grande antenne mesure 3,70 mètres de diamètre.*

Les étoiles en mouvement

François Mignard, Observatoire de la Côte d'Azur, laboratoire Lagrange

Un grand récit qui explique comment les hommes sont passés d'une vision statique de l'Univers où les étoiles occupaient des positions précises les unes par rapport aux autres sur la « sphère des fixes » à un monde dynamique où chaque astre possède sa vitesse propre. Une étude minutieuse indique les méthodes modernes permettant de réaliser des mesures.

Au cours des longs siècles qui jalonnent l'histoire de l'astronomie, les étoiles ont été rassemblées au sein de constellations dont la forme immuable ne laissait guère prise au doute. Aucun mouvement n'était décelable à l'échelle d'une vie humaine et des comparaisons d'alignements décrits par plusieurs générations d'astronomes confirmaient cette permanence. L'existence des cieux inaltérables au-delà de l'orbe lunaire avait fini par s'ériger en une doctrine difficile à contester.

Cette belle image s'est profondément altérée depuis le XVIIe siècle, à la fois pour des raisons théoriques et comme conséquence d'observations nouvelles qui remettaient en cause la fixité des cieux. Sur le plan théorique, la mécanique de Newton impliquait le mouvement permanent des astres massifs les uns par rapport aux autres dans la profondeur de l'espace, ainsi que l'instabilité d'un monde fini réglé par les lois de la gravitation. Ceci fut suivi d'observations décisives au début du siècle suivant qui prouvaient sans doute possible que les étoiles n'occupaient pas des positions relatives immuables sur la sphère céleste et que des mouvements très lents étaient décelables. À la fin du XIXe siècle, l'analyse des spectres mettra définitivement fin à cette image réductrice du monde avec la mise en évidence également d'un déplacement sur la ligne de visée. Tout ceci a été largement confirmé et étendu à l'ensemble des étoiles et plus tard des galaxies avec des conséquences fondamentales sur la structure de l'Univers. Dans ce texte, je retrace ces deux grandes étapes de l'astrométrie stellaire et ambitionne de montrer l'importance de ces découvertes pour la recherche moderne.

La sphère des fixes

La sphère des fixes n'est pas un dogme posé a priori pour des raisons de simplicité ou d'harmonie, mais un modèle scientifique du monde sidéral adopté à la suite d'observations soigneuses. En introduction du Livre VII de l'Almageste, Ptolémée (90-170 environ) prend grand soin d'apporter les preuves les plus sûres de l'absence totale d'un quelconque déplacement des étoiles les unes par rapport aux autres. Utilisant principalement les observations d'alignements rapportées par Hipparque (-190 ; -120 environ) près de trois siècles plus tôt, il ne note aucun changement perceptible durant cet intervalle conséquent. L'argument est très détaillé et porte sur plusieurs dizaines d'alignements ou de figures géométriques simples et remarquables. L'ensemble occupe cinq pages de l'ouvrage et le conduit à conclure à l'absence de mouvement sensible et à justifier le concept de la sphère des fixes. Par exemple, Hipparque rapporte que les étoiles α Cancri (Acubens), β Cancri (Altarf) et α CMi (Procyon) sont quasiment sur une même ligne sur le ciel et Ptolémée retrouve cet alignement. Bien entendu, l'ensemble de la sphère céleste est emporté par une rotation de 24 h, mais ce mouvement est de nature très différente et ne modifie pas les positions relatives, les alignements ou la forme des constellations.

Avec Copernic (1473-1543) la sphère céleste s'immobilise davantage puisque son mouvement global n'est qu'une apparence liée à la rotation de la Terre sur elle-même et non plus un mouvement réel d'une sphère cristalline. Les étoiles sont repoussées à des distances *immenses*, au sens propre, *immensus* signifiant au-delà de toute possibilité de mesure, alors que pour les astronomes antiques cette sphère matérielle se situait à quelques pas au-delà de la sphère de Saturne. Cet élargissement du monde était une nécessité dans le système héliocentrique pour être en accord avec l'absence de mouvement parallactique décelable des étoiles. Il fallait qu'elles fussent à des distances sans commune mesure avec celle de l'orbe de la Terre.

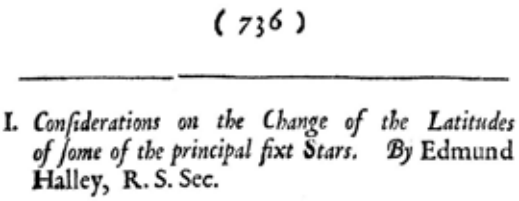
Il faudra la hardiesse intellectuelle de Giordano Bruno (1548-1600)[1] pour faire éclater le monde

1 Le Banquet des Cendres *(La Cena de le Ceneri)*, IIIe dialogue.

des fixes et la finitude du monde, dans une œuvre protéiforme plus philosophique que scientifique, vite tombée dans l'oubli et qui eut peu d'influence sur le cours de la science au moment où Tycho Brahé (1546-1601) donnait la priorité à l'observation sur la spéculation et où la mesure et l'expérience devenaient les sources premières du savoir avec Galilée (1564-1642). L'Univers devient infini et peuplé d'étoiles innombrables dont aucune n'est le centre du monde et le mouvement en est la règle. Son univers n'est pas seulement infini (ce que l'on en retient en général), il est aussi animé (ce qui est plus important pour le propos de ce texte).

Découverte du mouvement des étoiles

Cependant la véritable rupture vécue comme telle par les astronomes praticiens et concernant le déplacement vrai des étoiles arrive en 1716 lorsque E. Halley (1656-1742) met en doute l'immobilité des étoiles à partir d'observations et non sur une base spéculative. Dans une courte communication à la Royal Society, *Considerations on the Change of the Latitudes of Some of the Principal Fixed Stars*, le célèbre astronome attire l'attention sur les changements de positions des étoiles Sirius, Arcturus et Aldébaran, dans l'intervalle de 1800 ans[2] séparant les mesures récentes de celles rapportées par Ptolémée. Les données se concentrent sur la latitude écliptique qui, contrairement à la longitude ou aux coordonnées équatoriales, n'est pas sujette aux changements et incertitudes venant de la précession.


(736)

I. *Considerations on the Change of the Latitudes of some of the principal fixt Stars.* By Edmund Halley, R. S. Sec.

Fig.1. *Titre de l'article de E. Halley au Philosophical Transactions dans lequel il annonce le changement de latitude écliptique de quelques étoiles.*

Halley estimait que ces trois étoiles présentaient en 1717 un changement de latitude vers le sud respectivement de 20', 22' et 33'. Mais dans l'intervalle de 18,5 siècles, l'écliptique s'est déplacé par rapport aux étoiles et, une fois effectuée cette correction, il reste un mouvement vers le sud de l'écliptique de 37', 42' et 33', soit typiquement des variations de l'ordre de la seconde de degré par an. À noter que les positions dans le catalogue de Ptolémée ont une précision de l'ordre de 20' et donc le mouvement pointé par Halley est juste significatif pour une étoile mais prend du sens par sa répétition sur plusieurs sources indépendantes.

Il reviendra à Jacques Cassini (1677-1756) d'apporter la preuve quantitative du déplacement des fixes dans un mémoire présenté à l'Académie en 1738 et dans lequel il compare des positions d'Arcturus de Tycho Brahé (vers 1580), d'autres obtenues par J. Richer (1630-1696) lors de son voyage à Cayenne en 1672 et ses propres mesures effectuées à l'Observatoire de Paris. Par comparaison avec des étoiles voisines, Cassini établit définitivement qu'il ne s'agit pas d'une conséquence du changement du plan de l'écliptique, qui aurait affecté les étoiles proches de la même quantité, mais bien d'un déplacement de l'étoile par rapport au fond du ciel.

Tobias Mayer (1723-1762), malgré la brièveté de sa vie scientifique, s'est illustré par des travaux de premier ordre sur le mouvement de la Lune et la sélénographie et apporta une contribution décisive à la question des mouvements propres. L'astronome et historien de l'astronomie J.B. Delambre, peu prolixe en éloges, le qualifiait non seulement de plus grand astronome du XVIIIe siècle, mais de tous les temps et de tous les pays. T. Mayer est parvenu à mesurer le mouvement propre d'une quinzaine d'étoiles, sur une liste de 80, par comparaison à des positions obtenues par O. Rœmer 50 ans plus tôt. Dans son traité *Commentary on the proper motion of the fixed stars* il considère que le Soleil pourrait avoir un mouvement dans l'espace et que, dans ce cas, cela devrait être observable par une divergence du déplacement des étoiles dans la direction du mouvement du Système solaire. C'est bien ce que trouvera W. Herschel peu de temps après à partir des données laissées par T. Mayer.

Terminologie et conséquences

Ce déplacement des étoiles dans le temps les unes par rapport aux autres est qualifié de mouvement propre, pour le distinguer des mouvements apparents comme l'aberration ou l'effet parallactique, qui proviennent du mouvement de l'observateur ou ceux liés à la précession qui sont totalement artificiels et résultent de la rotation du système de référence équatorial par rapport aux axes de Copernic. Le mouvement propre correspond à un mouvement réel de l'étoile (il lui est propre) et/ou du Soleil et se manifeste par un changement des coordonnées des étoiles dans le temps, lorsque ces dernières sont rapportées à un système de référence unique pour les différentes époques. Avec le temps, les positions relatives changent et la figure des constellations se

2 Halley considère que les coordonnées de l'Almageste sont en fait des valeurs prises chez Hipparque environ en 130 BC.

déforme, comme on le voit pour la Grande Ourse sur la figure 2, dont les positions il y a 100 000 ans ont été calculées à partir des données du catalogue Hipparcos, des vitesses radiales et en prenant pour les étoiles un mouvement uniforme dans l'espace.

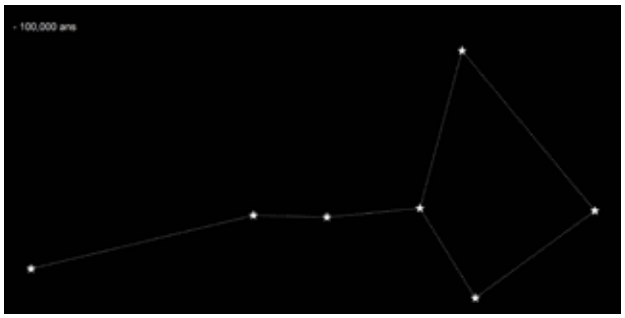


Fig.2. *La constellation de la Grande Ourse telle qu'elle apparaissait y a environ 100 000 ans. Les positions sont rapportées à δ Uma (intersection du manche et du quadrilatère). Les mouvements propres sont tous de l'ordre de 0,1"/an.*

Il s'agit bien ici d'une découverte majeure de l'astronomie de position avec de nombreuses conséquences. Tout d'abord sur le plan pratique, elle impliquait qu'un catalogue donnant la position des étoiles devait être mis à jour régulièrement. Plus précisément aux deux coordonnées de position (ascension droite et déclinaison par exemple) il fallait ajouter les deux composantes du déplacement annuel, c'est à dire la dérivée première des coordonnées, permettant de propager la position à une date différente de celle de la construction du catalogue.

Mais ce n'est pas là le point le plus important. Regardons plus près de chez nous le changement qu'apporte une vision dynamique par rapport à une vision statique de la Terre. On peut avoir une longue liste de coordonnées des différentes villes, ports, montagnes dans les différents continents et reporter cette information pour en faire une carte de haute précision, bien suffisante pour tous les besoins de la navigation maritime ou aérienne. Mais s'apercevoir au moyen de mesures géodésiques réalisées à 10, 20, 100 ans d'intervalle que les distances entre des points situés de part et d'autre des océans changent dans le temps est une découverte de première grandeur et fait passer de la vision statique du globe à une monde mouvant avec des continents en déplacements relatifs. La portée est considérable, même si sur le plan pratique de la navigation les conséquences sont mineures. Il en va de même avec les étoiles : mettre à jour les catalogues est secondaire, mais comprendre que les étoiles ont un mouvement dans l'espace, que ce mouvement obéit probablement à des lois, qu'il y a probablement une cause sous-jacente commune, est une grande avancée dans la compréhension du monde et la mission spatiale Gaia de l'Agence spatiale européenne se propose d'y contribuer.

Le mouvement propre au premier ordre

Variation de coordonnées avec le temps

Les valeurs typiques des variations d'ascension droite ou de déclinaison sont de 0,01" à 0,1" par an, et exceptionnellement plus grandes que 1" par an. La plus grande valeur observée est celle de l'étoile de Barnard avec un déplacement annuel de 10,3", soit environ un diamètre lunaire en deux siècles. Si cette étoile avait été plus brillante, nul doute que Ptolémée aurait noté son mouvement (près d'un degré pendant les trois siècles le séparant d'Hipparque) avec les conséquences que l'on peut imaginer sur la sphère des fixes.

La liste des étoiles du catalogue Hipparcos ayant les plus grands mouvements propres se trouve dans le tableau 1.

HIP	α deg	δ deg	V mag	π mas	μ_α mas/an	μ_δ mas/an	V_T km s^{-1}	Name
87937	269.454	+04.668	9.54	549.01	-797.84	10326.93	89.43	Barnard'sstar
24186	77.897	-45.004	8.86	255.26	6506.05	-5731.39	161.02	Kapteyn's star
57939	178.233	+37.733	6.42	109.21	4003.69	-5813.00	306.38	Groombr. 1830
114046	346.447	-35.856	7.35	303.90	6767.26	1326.66	107.57	Lacaille 9352
439	1.335	-37.352	8.56	229.33	5634.07	-2337.94	126.09	CD -37 15492
104214	316.712	+38.741	5.20	287.13	4155.10	3258.90	87.18	61Cyg-A
104217	316.717	+38.734	6.05	285.42	4107.40	3143.72	85.91	61Cyg-B
54035	165.836	+35.981	7.49	392.40	-580.20	-4767.09	58.01	Lalande 21185
108870	330.823	-56.780	4.69	275.76	3959.97	-2538.84	80.86	ϵ Ind
54211	166.384	+43.524	8.82	206.94	-4410.79	943.32	103.32	
19849	63.823	-07.645	4.43	198.24	-2239.33	-3419.86	97.75	o^2 Eri
70890	217.449	-62.681	11.01	772.33	-3775.64	768.16	23.65	α Cen-C

Tab. 1. *Liste des étoiles ayant les mouvements propres les plus importants dans le catalogue Hipparcos. Le mouvement propre en ascension droite (μ_α) et celui en déclinaison (μ_δ) sont données en millième de secondes d'arc (mas) par an.*

On remarquera que ce sont toujours des étoiles très proches, mais pas nécessairement brillantes. Le mouvement général d'une étoile simple sur le ciel pour un observateur terrestre est la résultante du mouvement propre, pratiquement rectiligne uniforme et du déplacement parallactique annuel qui est un effet apparent optique (parallaxe au sens strict) provenant du mouvement de l'observateur autour du Soleil et de la distance finie des étoiles. La figure 3 en donne une illustration qualitative.

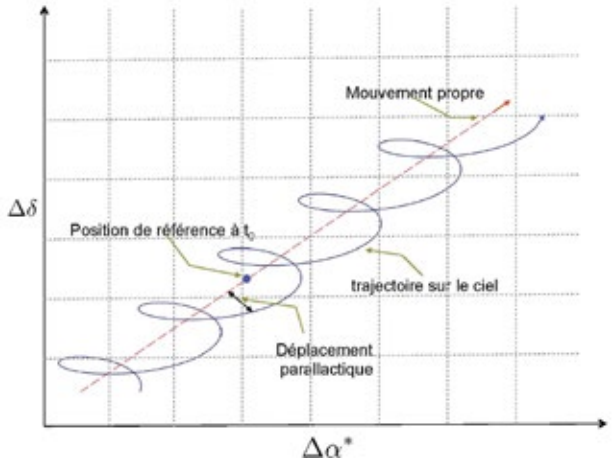


Fig. 3. *Déplacement sur le ciel dans un système de référence inertiel d'une étoile simple. Le mouvement apparent sur le plan du ciel est la résultante d'un déplacement systématique pratiquement uniforme (le mouvement propre) et des boucles annuelles de l'effet parallactique venant du mouvement de la Terre autour du Soleil.*

La vitesse radiale

On appelle vitesse radiale d'un astre la composante de sa vitesse sur la ligne de visée. Elle est généralement notée v_r et est exprimée en km·s^{-1}. Elle est positive dans le cas d'un éloignement et négative si l'astre se déplace vers l'observateur. Alors que la vitesse tangentielle n'est pas directement accessible (l'observation ne donne que le déplacement angulaire), la vitesse radiale peut être mesurée en tant que vitesse par l'effet Doppler-Fizeau et non déduite de la variation de la distance (ce qui est théoriquement possible, mais est encore hors de portée de l'astrométrie moderne).

L'effet du mouvement de l'observateur sur la fréquence d'une onde a été introduit sur une base théorique en 1842 pas Hans Christian Doppler (1803-1853) dans le mémoire *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels* (Sur la lumière colorée des étoiles doubles et de quelques autres corps célestes). Doppler justifiait l'effet sur la lumière par une analogie avec les ondes acoustiques. L'effet fut confirmé expérimentalement et quantitativement pour les ondes sonores quelques années plus tard par C.H. Buys-Ballot, mais bien plus tardivement pour la lumière au moyen de mesures astronomiques et son existence resta controversée pendant plusieurs décennies. Concernant la lumière elle-même et la couleur des étoiles, Doppler commet deux grosses erreurs dans cette étude. La couleur des étoiles n'est pratiquement pas affectée par le déplacement radial en raison du transfert du rayonnement IR ou UV vers le visible qui compense le déplacement de la partie visible. De plus les vitesses nécessaires, proches de 100 000 km·s^{-1}, sont sans rapport avec les vitesses orbitales des composantes des étoiles doubles. À noter que ce mémoire ne fait aucune allusion à la mesure des vitesses radiales et la nécessité de travailler sur des spectres de raies et non sur le spectre continu.

La formulation correcte pour les ondes lumineuses revient au physicien Armand Hippolyte Fizeau (1819-1896) dans un travail totalement indépendant présenté à la Société Philomatique de Paris en 1848, mais seulement publié en 1870 sous le titre *Effet du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d'onde des rayons de lumière*[3]. Fizeau, le premier, insiste sur la différence entre la couleur d'une source provenant de l'émission continue et peu influencée par le mouvement de l'observateur ou de la source, et le cas des raies spectrales qui sont déplacées vers le bleu ou le rouge et produisent un effet mesurable. L'extrait du texte de la figure 4 montre bien que le physicien avait conscience des applications astronomiques fondamentales qui découleraient de la mesure du décalage spectral. L'effet est toujours appelé Doppler-Fizeau en France, et cette dénomination était commune (voire même effet Fizeau tout court) dans toutes les publications de vitesses radiales de la fin du XIXe siècle, avant que l'habitude ne soit prise de n'y faire référence que par l'appellation tronquée d'effet Doppler.

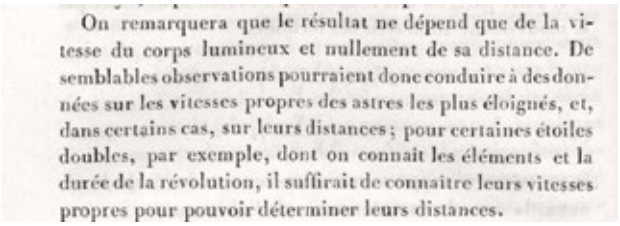

On remarquera que le résultat ne dépend que de la vitesse du corps lumineux et nullement de sa distance. De semblables observations pourraient donc conduire à des données sur les vitesses propres des astres les plus éloignés, et, dans certains cas, sur leurs distances ; pour certaines étoiles doubles, par exemple, dont on connaît les éléments et la durée de la révolution, il suffirait de connaître leurs vitesses propres pour pouvoir déterminer leurs distances.

Fig.4. *Extrait de l'article de H. Fizeau de 1870 dans les Ann. de Chimie et Physique, correspondant à sa communication de 1848 à la Société Philomatique de Paris.*

À noter que Ernst Mach (1838-1916) discute également en 1860 de l'effet du mouvement sur la longueur d'onde de la lumière en des termes similaires à ceux de Fizeau.

3 Annales de chimie et de physique, Vol. 19, Serie IV, 1870, p. 211-221.

Le principe fondamental de l'effet Doppler-Fizeau est purement lié à la cinématique de la propagation d'un signal émis à partir d'une source mobile par rapport à un observateur. La notion d'onde est secondaire car tout autre moyen de propagation à vitesse constante convient, comme cela est illustré sur la figure 5. Si deux signaux sont séparés par un intervalle T_0 dans le référentiel de la source, alors l'intervalle de réception de ces deux mêmes signaux (flash de lumière, crête d'une onde, paquet postal, coup de canon, éclipse des satellites de Jupiter, etc.) est donné par

$$T = T_0 (1 + v/c)$$

avec v pour la vitesse radiale de la source et c la célérité de la propagation par rapport à l'observateur.

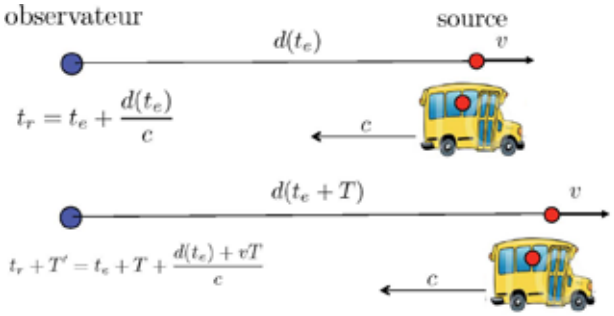


Fig.5. *Principe de l'effet Doppler-Fizeau à partir d'une source en mouvement produisant un signal périodique se propageant jusqu'à l'observateur. L'intervalle entre deux émissions (T) est différent de l'intervalle entre deux réceptions (T').*

Dans le cas d'un signal ondulatoire de longueur d'onde λ dans le référentiel de la source, on obtient : $\Delta\lambda/\lambda = v/c$ (voir page 10).

Mesures des vitesses radiales

Avec une vitesse radiale comparable à celle de la Terre autour du Soleil, soit 30 km·s^{-1}, le décalage des raies $\Delta\lambda/\lambda$ est de l'ordre de 10^{-4}, ce qui nécessite des spectroscopes ou spectrographes avec un pouvoir de résolution élevé, d'autant plus que l'objectif est d'atteindre des précisions meilleures que le km·s^{-1}.

Historiquement la spectroscopie astronomique s'est avant tout préoccupée de l'analyse des spectres pour comprendre la physique de l'atmosphère des étoiles et des nébuleuses (s'agissait-il d'étoiles agglomérées ou de nuages de gaz chaud ?) et reconnaître la composition chimique des astres. J. Fraunhofer (1787-1826) en a été le déchiffreur initial sur le spectre solaire, mais le véritable pionnier de la spectroscopie astronomique stellaire est le britannique Sir W. Huggins (1824-1910) à partir de 1863. Ce n'est pas un astronome au sens classique du terme et il a dû faire face au scepticisme des astronomes du sérail pour imposer une technique totalement nouvelle, venant d'une autre discipline, qui s'est avérée aussi féconde pour la connaissance des astres que l'arrivée des lunettes et des télescopes dans les siècles précédents. Les aspects théoriques concernant l'absorption et l'émission par les gaz chauds sont l'œuvre de G. Kirchhoff (1824-1887) et R. Bunsen (1811-1899) en 1859 et 1860 à l'Université de Heidelberg. Ce travail exceptionnel marque le véritable début de l'astrophysique et une évolution irréversible de l'astronomie.

Dès 1868, les premiers essais ont été entrepris pour détecter un éventuel décalage spectral entre le spectre d'une étoile et un spectre de référence produit en laboratoire. La méthode était visuelle et le manque de lumière sur un spectre fortement dispersé rendait la mesure extrêmement difficile, voire impossible, très exigeante pour la vue des observateurs, et de toute façon uniquement envisageable pour les étoiles les plus brillantes. Huggins communique un premier résultat avec la vitesse radiale de Sirius à +46 km·s^{-1}, corrigée de la vitesse de la Terre autour du Soleil. Bien que totalement erronée en signe et en valeur, c'est bien la première tentative de détermination à partir de l'effet Doppler-Fizeau, à un moment où la réalité de l'effet n'était pas établie. Plus tard l'erreur probable des mesures visuelles a été estimée à environ 20 km·s^{-1}, un niveau qui les rendait marginalement utiles pour l'astronomie. Les erreurs systématiques étaient probablement encore plus élevées. Si l'on prend par exemple les 48 étoiles mesurées au Temple Observatory dans les années 1880, elles aboutissent à de grandes valeurs toutes négatives, ce qui est pour le moins suspect[4] .

Ce n'est qu'avec le couplage des spectroscopes et de la photographie (donc la construction des spectrographes) que des résultats réalistes et précis furent obtenus dans les années 1890 avec H.C. Vogel (1841-1907) et J. Scheiner (1858-1914 à Potsdam), les véritables fondateurs de la spectrographie des vitesses radiales. La mise en évidence directe de la rotation du Soleil par la différence des vitesses radiales aux deux bords et la modulation des vitesses radiales par le mouvement orbital de la Terre apportèrent la confirmation ultime de la réalité de l'effet Doppler-Fizeau et de sa relation avec les mouvements radiaux des sources relativement aux observateurs. Mais la découverte la plus extraordinaire faite par Vogel a été la détection des étoiles binaires spectroscopiques et la preuve que les variations d'éclat de l'étoile variable Algol était en relation avec un mouvement orbital d'un astre peu lumineux qui passait périodiquement devant le disque d'Algol. Les systèmes binaires spectroscopiques sont des étoiles doubles non

4 Voir J.B. Hearnshaw, The analysis of starlight, Cambridge.

résolues visuellement et dont le mouvement orbital est mis en évidence par la variation périodique de la vitesse radiale, donc par la spectroscopie. La détection des planètes extrasolaires par la méthode des vitesses radiales est une méthode tout à fait similaire, mais avec une répétabilité meilleure que le m.s^{-1}. À noter que l'on cherche ici des variations de vitesse au cours du temps et que l'exactitude est moins importante que la précision. Un biais constant sur la vitesse radiale n'empêche pas la détection de la modulation de la vitesse au cours du mouvement orbital de la planète.

Une première liste de vitesses radiales rapportées au Soleil est publiée en 1892 pour 51 étoiles, avec une précision de 2-3 km·s^{-1}, soit d'un seul coup une amélioration d'un ordre de grandeur par rapport aux mesures visuelles. À titre d'illustration, la vitesse radiale de Sirius est trouvée à –9,1 km·s^{-1} et celle de Véga à –15,2 km·s^{-1} alors que les valeurs modernes sont respectivement de –7,6 et –13.9 km·s^{-1}.

C'est le démarrage d'une collecte laborieuse et à faible rendement à laquelle vont s'atteler la plupart des grands observatoires en Europe, en Russie et aux États-Unis. La découverte d'étoiles présentant des vitesses radiales supérieures à 75 km·s^{-1} en relation avec leur position dans le plan galactique est à l'origine de la découverte de la rotation galactique, un résultat fondamental dans l'histoire de l'astronomie. Au début des années 1920, les vitesses radiales sont connues pour environ 2 000 étoiles avec un accroissement annuel de 250 nouvelles étoiles. Le catalogue général des vitesses radiales contient les résultats pour environ 7 000 étoiles en 1931, puis 15 000 dans les années 1960 et environ 50 000 autour de l'an 2000 avant l'arrivée des relevés à plus grand champ et l'obtention simultanée de nombreux spectres. En 2015, on connaît les vitesses radiales pour un maximum de 500 000 étoiles et Gaia va en fournir plusieurs millions en 2018 et probablement 100 millions en 2022.

Mesures brutes et mesures normalisées

Le décalage spectral mesuré depuis un observatoire terrestre conduit à la vitesse radiale de la source par rapport à l'observateur à l'époque de la mesure. L'observateur est entraîné par la rotation de la Terre, par le mouvement orbital de la Terre autour du Soleil et par le petit mouvement de la Terre autour du barycentre du système Terre-Lune, autant de corrections à effectuer pour parvenir à une vitesse radiale standard, qui se rapporte à un point moins mobile, ou plus précisément dont la vitesse de déplacement n'est pas soumise à des variations rapides. Le point de référence choisi est le barycentre du Système solaire, puisque sa position et sa vitesse par rapport aux étoiles n'est l'objet de changements notables que sur des durées très longues associées à la rotation galactique. Les ordres de grandeur de ces effets sont aisés à estimer :

- Mouvement de rotation de la Terre :

$V \approx 0{,}460 \times \cos \varphi$ km·s^{-1}, fonction de la latitude φ.

- Mouvement orbital de la Terre $V \approx 29{,}8$ km·s^{-1}, dans le plan de l'écliptique et légèrement variable ($\pm 0{,}5$ km·s^{-1}) au cours de l'année.

- Mouvement du Soleil autour du barycentre du Système solaire, de l'ordre de grandeur de 0,02 km·s^{-1} et dominé par la période orbitale de Jupiter.

- Mouvement autour du barycentre du système Terre-Lune : variation mensuelle d'amplitude 0,012 km·s^{-1}.

Toutes ces vitesses doivent être projetées sur la ligne de visée pour chaque observation et comptées avec le bon signe ! En pratique les trois dernières contributions apparaissent automatiquement dans la vitesse de la Terre prise dans une éphéméride de bonne précision rapportée au barycentre du Système solaire. D'autres corrections proviennent de l'étoile elle-même, puisque le champ de gravitation est aussi la source d'un petit décalage spectral (dilation du temps en fonction du potentiel gravitationnel), et que la surface de l'étoile est agitée par des mouvements convectifs de matière dont la moyenne n'est pas nulle. Des mesures répétées au cours des mois et des années mettent en évidence des variations de vitesses radiales pour de nombreuses étoiles provenant cette fois-ci du mouvement variable de l'étoile si le système est multiple ou bien si elle est accompagnée par un système planétaire.

Utilisation des vitesses radiales

Je me concentre ici sur les vitesses radiales, mais la spectroscopie en astronomie est bien plus riche que l'aspect cinématique et touche à la composition des astres, à l'évolution des étoiles et des galaxies, à l'histoire de l'Univers, de nombreux domaines qui exploitent les spectres mais pas nécessairement les décalages spectraux.

Parallaxes statistiques

En premier lieu la vitesse radiale fournit la troisième composante du mouvement, le long de la ligne de visée, comme une mesure réelle et non comme une projection angulaire. Considérons un grand nombre d'étoiles dont on possède le mouvement tangentiel angulaire et la vitesse radiale en km·s^{-1}.

Statistiquement, la valeur du mouvement tangentiel en km·s^{-1} ne doit pas être très différente de la vitesse radiale. Donc on peut obtenir une estimation statistique de la parallaxe, donc de la distance, exactement ce qu'avait déjà mentionné Fizeau dans l'extrait de la figure 4. L'application à des étoiles individuelles est limitée, mais la méthode est très efficace pour les étoiles groupées en amas dont les directions de déplacement dans l'espace sont parallèles les unes aux autres.

Étoiles binaires spectroscopiques

Il s'agit ici de système comportant deux étoiles trop proches l'une de l'autre pour que les composantes puissent être résolues par une observation télescopique mais dont le mouvement orbital (d'une seule ou des deux composantes) est décelé par la variation périodique de la vitesse radiale. Considérons une étoile binaire avec des composantes E_1 et E_2 en orbite autour du centre de gravité du système. La théorie du mouvement elliptique dans l'espace permet de calculer la vitesse radiale d'une composante. La figure 6 donne l'allure des courbes de vitesses pour différentes valeurs de l'excentricité. L'amplitude est prise égale à 10 km·s^{-1} et la vitesse radiale du système est de 0.

Si le spectre de l'étoile E_1, ou des deux étoiles E_1 et E_2, est observable, on parvient à suivre les variations de la vitesse radiale au cours de l'orbite et à déterminer la période P ainsi que les éléments géométriques de l'orbite et finalement donner une contrainte sur les masses. L'inclinaison i de l'orbite sur le plan du ciel ne permet pas d'avoir la dimension réelle de l'orbite, mais seulement a_1 sin i (a_1 étant le demi-grand axe de l'orbite absolue de E_1) et éventuellement a_2 sin i et cette ambiguïté ne peut être levée que pas des mesures astrométriques complémentaires, ou photométriques si l'étoile est également une binaire à éclipse, comme Algol.

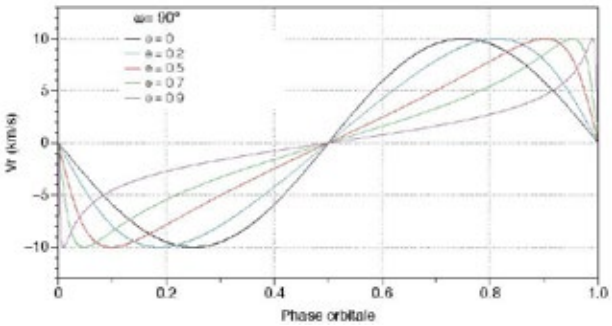
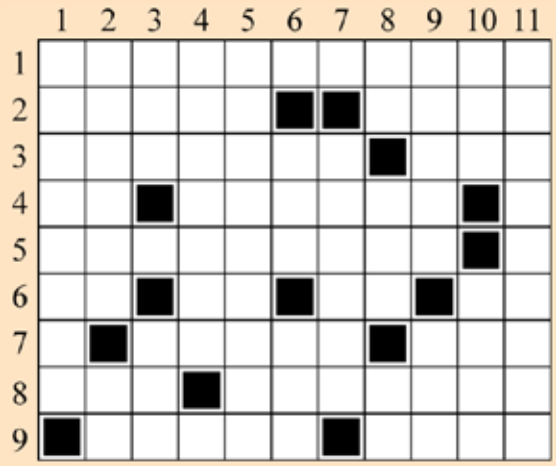


Fig.6. *Courbes de la vitesse radiale d'une composante d'une étoile binaire spectroscopique pour différentes valeurs de l'excentricité.*

■

Vous trouverez sur notre site l'article complet de François Mignard que nous avons dû réduire ici pour des problèmes de place. Vous y trouverez en particulier des calculs sur les variations de coordonnées, sur le mouvement propre des étoiles ou sur le mouvement elliptique des étoiles doubles.



Horizontalement

1. Indispensable pour parler de vitesse.
2. Sa vitesse n'est pas nulle. Norme.
3. Il pensait que la couleur des étoiles venait de leur vitesse radiale. Vous pouvez en faire un au CLEA.
4. Astronomie de l'invisible. À bonne vitesse.
5. Comme l'objectif du satellite Gaia.
6. Article. Note. Sa vitesse dépend du processeur. On trouve une de ses raies d'absorption au milieu du doublet du sodium.
7. Celui du Soleil se fait plus vite à l'équateur que chez nous. La vitesse du son dépend de sa température.
8. Programme spatial suisse. Plus on va vite, plus on en consomme.
9. Vite. Ils ont trop roulés.

Verticalement

1. Vitesses d'approche ou d'éloignement.
2. Comme la vitesse d'Arcturus. On peut y dépasser la vitesse de la lumière.
3. Radio mais pas astronomie. La deuxième a trait aux vitesses.
4. Ascendant.
5. Comme toutes les vitesses.
6. 15e étoile la plus brillante. Elle doit dépasser les 8 km·s^{-1}.
7. Ce ne sont pas de tristes sires.
8. Possessif. Grand ou petit, il voit bien la nuit. Le suffixe du site du CLEA.
9. Celui des Cahiers Clairaut se trouve sur le site du CLEA. 40 pour les Cahiers Clairaut.
10. Son observatoire est dans le sud. Son observatoire est dans le Sud.
11. Comme des vitesses qui ne sont pas angulaires.

Solution p. 40

Les vitesses sur le site du CLEA

Pour prolonger le thème des vitesses, vous trouverez de nombreux compléments sur notre site (clea-astro.eu). C'est une mine de renseignements, il ne faut pas hésiter à aller y fouiller. Les abonnés numériques trouveront sur la version en ligne de ce numéro les liens directs avec les articles cités.

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (clea-astro.eu/archives).

- La vitesse de la lumière et Roemer : CC 130 (2010), CC 67 (1994), CC 57 (1992)
- Histoire de la vitesse de la lumière : CC150 (2015), CC 83-84-85 (1998-1999)
- Pour mesurer la vitesse de la lumière : CC151 (2015), CC 120 (2007), CC116 (2006), CC96 (2001)
- Effet Doppler, vitesses radiales et exoplanètes : CC137 (2012), CC136 (2011), CC118 (2007) CC117 (2007)
- Vitesses radiales et expansion de l'Univers : CC117 (2007).

Nous rappelons que tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès, les numéros plus récents sont réservés aux abonnés numériques.

Sur LUNAP (http://clea-astro.eu/lunap)

Vous trouverez des notions en bref, des compléments et des activités aux onglets :

- vitesse de la lumière ;
- vitesses orbitales.

L'école d'été du CLEA 2018

Les dates : 17 au 24 août 2018.

Le lieu : Centre d'oxygénation du col Bayard, au nord de Gap, à plus de 1200 m d'altitude.

Le thème (provisoire) : "L'Univers en mouvement, des lunes aux galaxies".

Inscriptions : elles sont ouvertes sur le site du CLEA, clea-astro.eu, jusqu'au 31 mai.

L'école d'été d'astronomie se déroule sur une semaine à Gap Col Bayard, dans une ambiance alpine, studieuse et conviviale. Elle s'adresse aux enseignants de tous niveaux (école, collège et lycée) et de toutes disciplines ainsi qu'aux animateurs scientifiques. Elle est organisée autour de cours théoriques, d'ateliers et d'observations.

Les cours matinaux sont consacrés à l'acquisition des savoirs.

Les ateliers pédagogiques de l'après-midi sont dédiés à leur exploitation en classe et au partage de savoir-faire : analyse de documents, réalisation de maquettes, applications sur le terrain ou utilisation de logiciels.

Lors des soirées d'observation, vous pourrez découvrir le ciel, à l'œil nu ou à l'aide d'instruments, apprendre à repérer les constellations, vous initier à l'astrophotographie et à la spectroscopie…

Vous trouverez très prochainement le programme sur notre site, à la page d'accueil.

L'éclipse totale de Lune du 27 juillet 2018

Les horaires (en heure légale)

Entrée dans l'ombre : 20 h 24

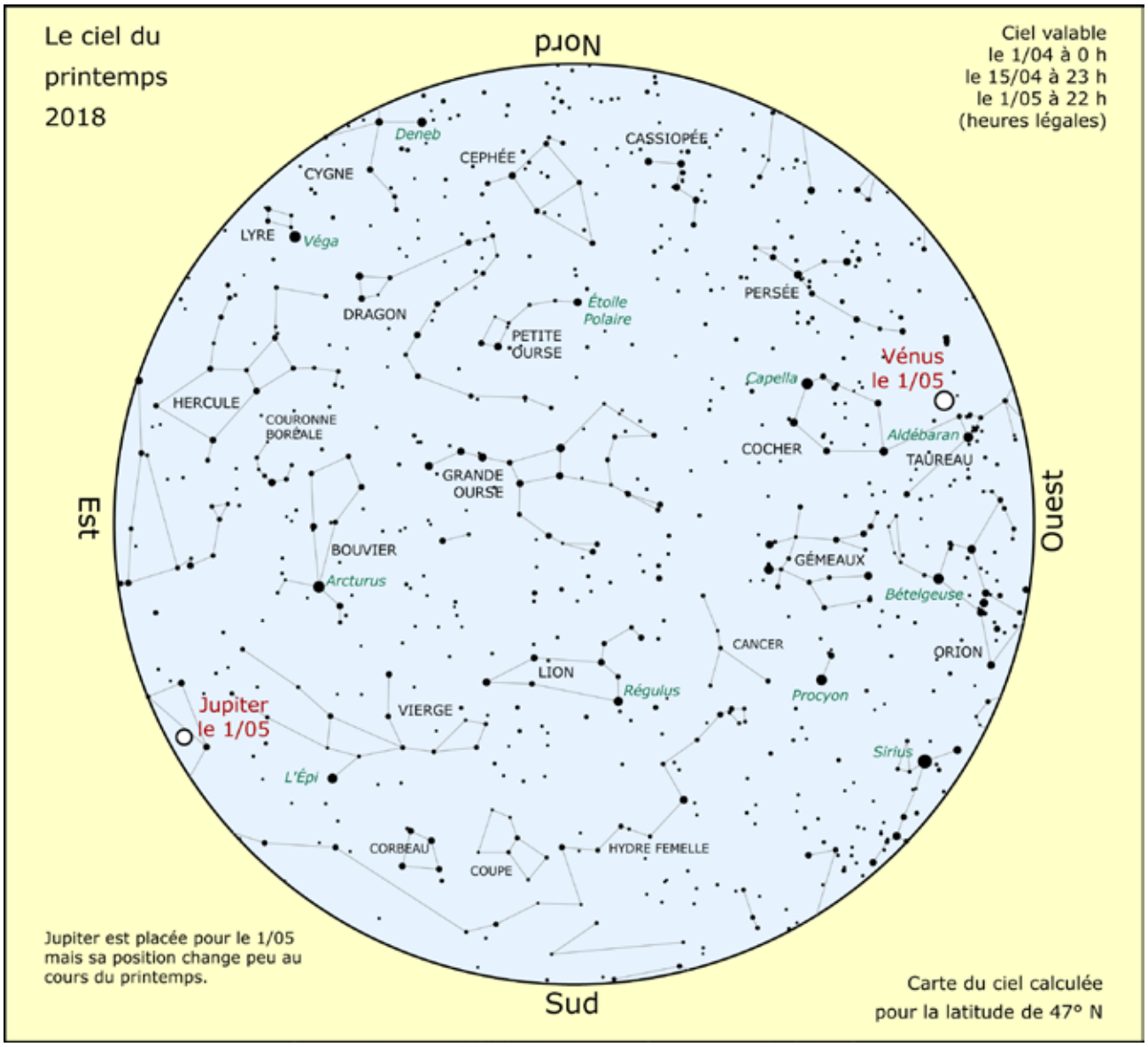
Début de la totalité : 21 h 30

Fin de la totalité : 23 h 13

Sortie de l'ombre : 0 h 19

En France métropolitaine, la Lune se lèvera entre 21 h et 22 h, donc déjà partiellement ou totalement éclipsée. Toute la deuxième moitié de l'éclipse sera facilement observable dans la direction sud-est. Nous en reparlerons dans notre prochain numéro mais vous pouvez déjà prévoir de l'observer et de la faire observer.

OBSERVATION



Visibilité des planètes

Vénus brille tous les soirs entre l'ouest et le nord-ouest. Au télescope, elle est gibbeuse, en attendant l'élongation maximale du mois d'août. Fin juin, on pourra deviner **Mercure** en dessous à droite.

Mars rétrograde du 28 juin au 28 août, ce sera la meilleure période pour l'observer mais elle est visible dès le début du printemps en 2e partie de nuit dans le Sagittaire et le Capricorne.

Jupiter sera au plus près de la Terre début mai. À observer sans modération tout le printemps.

Saturne se lève un peu plus tard que Jupiter, son opposition aura lieu fin juin. Mais elle est bien visible ce printemps.

Quelques évènements (heures légales)

20/03 : équinoxe de printemps à 17 h 15 min.
25/03 : passage à l'heure d'été.
1-3/04 (matin) : rapprochement Mars-Saturne.
17-18/04 : rapprochement Lune, Vénus avec les Pléiades.
22/04 : maximum des Lyrides (étoiles filantes).
06/05 : maximum des Êta Aquarides (étoiles filantes).
09/05 : opposition de Jupiter.
16/06 : rapprochement Lune-Vénus dans le Cancer.
21/06 : solstice d'été à 12 h 07.
27/07 (soir) : **éclipse totale de Lune** visible en France...

Lune

Nouvelle Lune : les 16/04, 15/05, 13/06.
Pleine Lune : les 31/03, 30/04, 29/05.

7 couleurs, 12 langues et quelques nuances

Anne-Marie LOUIS anne-marie.louis@wanadoo.fr

Non, il n'y a pas 7 couleurs dans l'arc-en-ciel et dans le spectre de la lumière blanche, mais une infinité. Les langues qui proposent un moyen de mémoriser ces couleurs sont nombreuses : l'alphabet latin employé par une dizaine d'entre elles permettra à 39 % de la population mondiale de lire cet article. Et, afin de toucher un public plus large, ajoutons quelques caractères cyrilliques et chinois…

Dans l'article intitulé *Trois étoiles pour Henry VI* (page 16 - n° 157 – printemps 2017), nous avions vu qu'il était probable que la mort de Richard d'York soit à l'origine d'une phrase en anglais permettant de retrouver les couleurs principales de l'arc-en-ciel : **R**ichard **O**f **Y**ork **G**ave **B**attle **I**n **V**ain[1] (*Richard d'York livra bataille en vain*) ! Certains, refusant l'image de la défaite, ont transformé ainsi la phrase : **R**ichard **O**f **Y**ork **G**ained **B**attle **I**n **V**ictory ! D'autres, sans doute pour éviter l'évocation de la fâcheuse bataille de Wakefield, ont préféré : **R**inse **O**ut **Y**our **G**ranny's **B**oots **I**n **V**inegar (*Rince les bottes de ta grand-mère dans le vinaigre*) !

Vous pouvez aussi retenir le nom du "rainbow guy" **Roy G. Biv**, auquel sont associées de petites chansons que vous n'êtes pas obligés d'écouter.

Acronymes et mnémoniques

Et en français ? Si vous n'en connaissez aucun, **VIBVJOR** est l'acronyme des couleurs de l'arc-en-ciel, auquel sont associées des phrases mnémoniques comme : **V**ous **I**nventez **B**ien, **V**ous, **J**eune **O**isif **R**idicule. Ou bien : **V**ous **I**ci **B**elle **V**oisine, **J**olie **O**vation **R**adieuse.

Mais si vous préférez le sens **ROJVBIV** vous emploierez plutôt : **R**egarde **O**belix, **J**'ai **V**u **B**ataille **I**ci, **V**a ! Il est évident qu'ici certains lecteurs s'interrogent sur l'intérêt de ces phrases, vu qu'ils connaissent par cœur ces couleurs sans y avoir recours, et qu'ils auraient plutôt tendance à réciter les couleurs pour tenter de retenir une phrase stupide et capillotractée !

Voyez plutôt la phrase mnémonique en polonais : **Cz**emuś **Po**szła **Ż**abko **Zielon**a **N**a **Gr**ób **F**araona ? (*Pourquoi la grenouille verte est allée sur la tombe du pharaon ?*) Cette phrase vous permettra de retenir, en polonais, les sept couleurs sans problème (et sans qu'il soit nécessaire de traduire) : **Cz**erwony, **Po**marańczowy, **Ż**ółty, **Zielon**y, **N**iebieski, **Gr**anatowy, **F**ioletowy. Mais faute de voyelles, ici l'acronyme n'est pas utilisable.

De même en russe : **К**аждый **О**хотник **Ж**елает **З**нать **Г**де **С**идит **Ф**азан (*Chaque chasseur souhaite savoir où le faisan se repose*). Commode pour retrouver : **К**расный, **О**ранжевый, **Ж**ёлтый, **З**елёный, **Г**олубой, **С**иний, **Ф**иолетовый.

Vous remarquerez que c'est plus agréable quand les phrases ont un sens ! Si ce moyen vous convient, il existe une phrase du même genre en espagnol pour **los colores del arco iris** :

Rodolfo **Na**rizotas **Am**ó de **Verd**ad a **Azu**cena el **Añ**o en que la **Vió** (*Rodolphe Gros-nez a aimé pour de vrai Azucena dès l'année où il la vit*) : **Ro**jo **Na**ranjo **Am**arillo **Verd**e **Azu**l **Añ**il **Vio**leta

Photo 1 *: Huaca El Dragón ou Arco Iris – Situé près de Trujillo au Pérou, ce sanctuaire attribué sans certitude à la culture chimú est entièrement rénové. Sur les bas-reliefs apparaissent des danseurs de la pluie, un arc-en-ciel entourant un dragon serpent, des nuages au-dessus et d'autres emblèmes de la fertilité.* https://es.wikipedia.org/wiki/Huaca_del_Dragón

Dans certaines langues l'acronyme est facile à retenir, comme par exemple en néerlandais où **ROGGBIV** signifie : **R**ood, **O**ranje, **G**eel, **G**roen, **B**lauw, **I**ndigo, **V**iolet, et en norvégien où **ROGGBIF** représente : **R**ød, **O**ransje, **G**ul, **G**rønn, **B**lå, **I**ndigo, **F**iolet.

1 Red Orange Yellow Green Blue Indigo Violet

Terminons par quelques phrases plus élaborées et moins évidentes : en portugais on utilise comme mnémonique **Vermelho là vai violeta**, ou encore Vermelho Là V*a*i *violeta (*rouge qui va vers le violet*). Les deux couleurs extrêmes sont données en clair ; il faut juste retenir **LA VAI** pour **L**aranja, **A**marelo, **V**erde, **A**zul et **I**ndigo. L'acronyme correspondant est **VLAVAIV**, mais on peut préférer **VAAVAAV**, obtenu en remplaçant laranja par alaranjado et indigo par anil : **V**ermelho, **A**laranjado, **A**marelo, **V**erde, **A**zul, **A**nil, **V**ioleta.

Italien – Ni acronyme, ni phrase mnémonique : comment qualifier ce **RoAranGiVerTurInVio** trouvé à plusieurs reprises, et qui semble intraduisible ? Mieux vaut apprendre les **sette colori dell'arcobaleno** : **Ro**sso (*rouge*), **Aran**cione (*orange*), **Gi**allo (*jaune*), **Ver**de (*vert*), **A**zzurro (*bleu clair*) remplacé ici par **Tur**chese (*bleu foncé*), **In**daco (*indigo*), **Vio**letto (*violet*).

Écoutez plutôt cette jolie poésie pour enfants[2] : "Se dell'**arcobaleno** i colori non sai : continua a guardare et l'imparerai" (*si tu ne connais pas les couleurs de l'arc-en-ciel : continue à regarder et tu les apprendras*). Sage conseil en effet.

Certaines langues asiatiques utilisent l'alphabet latin. En indonésien l'arc-en-ciel se dit **pelangi** et pour les couleurs on utilise l'acronyme **MEJIKUHIBINIU** : **Me** pour merah (*rouge*), **Ji** pour jingga (*orange*), **Ku** pour kuning (*jaune*), **Hi** pour hijau (*vert*), **Bi** pour biru (*bleu*), **Ni** pour nila (*indigo*), **U** pour ungu (*violet*).

Et en javanais ? demanderont nos lecteurs curieux : l'arc-en-ciel se dit **kluwung**. L'acronyme devient **AJIKUIBINIU**, puisque quelques couleurs changent : **A** pour abang (*rouge*), **JI** pour jinggo (*orange*), **KU** pour kuning (*jaune*), **I** pour ijo (*vert*), **BI** pour biru (*bleu*), **NI** pour nilo (*indigo*), **U** pour ungu (*violet*).

Chinois – Il n'y a pas de phrase mnémonique pour les sept couleurs, mais on marque un temps entre hóng, chéng, huáng, lù, et les suivantes qīng, lán, zǐ. Facile en pinyin (sans oublier les tons), donc essayez les sinogrammes :

红 橙 黄 绿 une petite pause puis 青 蓝 紫

Lumineux, non ?

Un grand merci à Dorota, Marthe, Brigitte et Milo, Claudine et Alain, Juwana et Yan pour leurs contributions polyglottes.

Les photos, non retouchées, ont été prises au Pérou, aux Açores, au Tibet, en Franche-Comté et en Savoie.

■

Si vous (ou vos élèves) connaissez une phrase mnémotechnique en allemand, en latin, en grec, en turc, en coréen, en arabe ou en islandais, n'hésitez pas à nous l'envoyer avec sa traduction.

2 http://igufinarranti.altervista.org/filastocca-impariamo-colori-dellarcobaleno/

Assemblée générale du 28 janvier 2018

Comme d'habitude, l'assemblée générale s'est déroulée dans une excellente ambiance.

Les nouveaux membres du CA sont : Appéré Thomas, Balin Dominique, Bardin Daniel, Berthomieu Francis, Bobin Michel, Cartier Nathalie, Causeret Pierre, Chadebec Denis, Chaty Sylvain, Duval Marie-France, Eyraud Charles-Henri, Ferrari Cécile, Fouquet Jean-Luc, Garreau Brigitte, Gayrard Olivier, Grauss Bernard, Hauguel Véronique, Imbault Danièle, Jouguelet Éric, Larcher Christian, Lecoutre Chantal, Lecoutre Georges, Maurel Danièle, Paupart Daniel, Pitout Frédéric, Primout Roseline, Ripert Jean, Silva Gregory Thiault Sylvie, Vienney Jean-Michel.

Et **le nouveau bureau** est ainsi constitué : **Présidente** : Ferrari Cécile ; **Secrétaire** : Imbault Danièle ; **Secrétaire-adjoint**: Fouquet Jean-Luc ; **Trésorière** : Thiault Sylvie ; **Trésorière-adjointe** : Lecoutre Chantal.

Le feu d'artifice final fut tiré par Sylvain Chaty qui nous a présenté une très belle conférence sur l'univers gravitationnel.

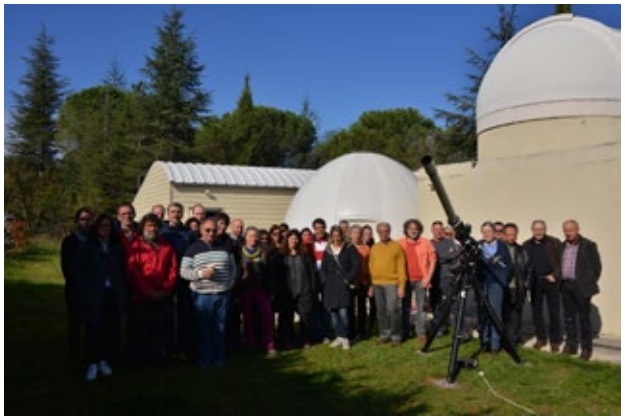
Des stages labellisés CLEA pour les enseignants

Jean-Luc Fouquet

Cette année, deux stages de formation continue pour les professeurs de collège et de lycée ont pu être organisés dans l'académie de Bordeaux, le premier à l'observatoire de Montayral près de Fumel dans le Lot-et-Garonne, et le second au château d'Abbadia à Hendaye au Pays basque. Ces rencontres de deux jours chacune, orchestrées au sein de la DAAC (Action Culturelle) du rectorat de Bordeaux par Roseline Primout étaient labellisées CLEA, ce qui a permis à d'éminents animateurs de notre association (comme moi) de participer à l'organisation des cours et des ateliers. Les stagiaires, enseignants a priori dans plusieurs disciplines aussi bien littéraires que scientifiques, peuvent ainsi découvrir des conférences et activités telles que celles pratiquées à l'école d'été par exemple, en lien avec les programmes et les préoccupations de leurs propres matières.

« L'astronomie nous transporte », stage des 27 et 28 mars 2017

Le petit village de Montayral possède un très bel observatoire construit étapes par étapes par une bonne équipe d'astronomes amateurs passionnés, et comportant une grande salle de réunion avec posters et maquettes, des pièces annexes pour les ateliers en groupes restreints, un petit planétarium numérique avec des fauteuils comme au cinéma, et de nombreux instruments dont deux télescopes de 300 mm et de 500 mm sous coupole.



Nos hôtes, professionnels de l'animation, ont d'ailleurs proposé de participer pleinement au déroulement du stage, avec des observations du Soleil, des séances de planétarium, ou encore une marche folle dans la campagne environnante pour la construction d'un système solaire à l'échelle.

Les trois conférences de ces deux jours de stage portaient sur le Système solaire, sur les exoplanètes, avec aussi une présentation du projet IRiS. Elles ont été présentées par Frédéric Pitout de l'IRAP, membre du CLEA comme les cinq professeurs chargés d'animer les 8 ateliers axés sur le Système solaire (Jupiter et Galilée, rétrogradation de Mars, mouvements dans le zodiaque…) ainsi que sur la construction de maquettes (planisphère, constellations en 3D…).

Certaines démarches pédagogiques présentées dans une moitié de ces ateliers seront reprises et amplifiées

dans le second stage de fin d'année à Hendaye, car elles portent sur des travaux au long cours pour le compte du CLEA, deux projets entrepris depuis quelques mois :

- un travail sur les conceptions initiales, sur l'analyse des fausses images rencontrées dans les ouvrages ou sur la toile, et plus généralement sur l'opposition entre science et croyance en astronomie, sujet du prochain hors-série n° 13 en préparation ;
- un travail sur le patrimoine culturel dans l'académie de Bordeaux, à partir d'un ouvrage très ancien édité de 1524 à 1609 intitulé *Cosmographie*, de Pierre Apian, et comportant de nombreuses maquettes qu'il est ô combien intéressant d'analyser et de « moderniser » !

« Astronomie et navigation », stage des 13 et 14 décembre 2017

Le château d'Abbadia, construit par Viollet-le-Duc de 1864 à 1879, appartient depuis 1895 et aujourd'hui encore à l'Académie des Sciences. C'est dans ce cadre magique que Roseline put organiser ce deuxième stage de formation continue de la DAAC avec l'aide de deux autres membres du CLEA (Jean-François Vidaillac et moi-même) pour l'organisation des animations et des ateliers, et tout naturellement avec la participation d'un membre de l'Académie des Sciences, Jean-Eudes Arlot, astronome émérite de l'Observatoire de Paris-Meudon, qui assura les trois conférences sur l'astrométrie, thème relié à la lunette du lieu et à l'histoire du château-observatoire.

Céline Davadan, chargée du patrimoine et de la Culture pour l'Académie des Sciences et donc de l'accueil au château, s'occupa activement de l'intendance et de la visite de ce lieu étonnant. Comme dans le stage du mois de mars, le temps nécessaire à l'élaboration de projets pluri-

disciplinaires permit à ces professeurs enseignant dans différentes matières de confronter leurs idées, avec la possibilité d'un suivi dans la mise en pratique après leur stage.

Le contenu des conférences et ateliers peut être retrouvées à l'adresse suivante : https://promenade.imcce.fr/fr/pages5/51.html

Les « volvelles d'Apian » et le travail d'une équipe

Dans chacun des deux stages, l'un des ateliers portait sur un important travail entrepris par Roseline sur les livres anciens issus du site Uranie et présents à la Bibliothèque Universitaire de Talence (BUST), et en particulier sur l'ouvrage de Pierre Apian, édité de 1524 à 1609 et intitulé *Cosmographia*. Elle est aidée pour cela par une bonne équipe du CLEA : Véronique Hauguel pour l'interprétation et la compréhension des documents, Pierre Causeret pour l'élaboration d'une version « moderne » des précieuses maquettes évoquées dans ce livre ancien, et par Charles-Henri Eyraud* pour les enregistrements vidéo et la réalisation d'un média croisé**. Cette démarche s'inscrit dans le cadre des PEAC (Parcours d'éducation artistique et culturelle) ; elle est définie dans les lignes suivantes :

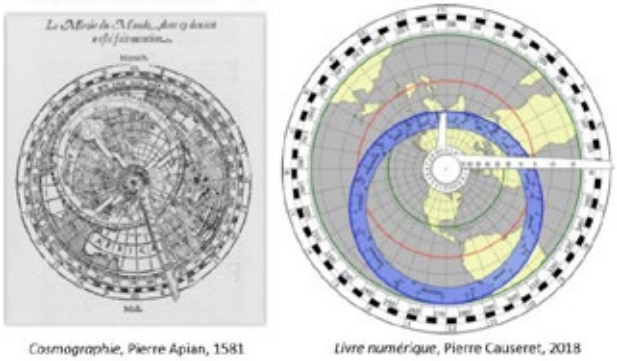
Descriptif de l'action

Aborder des livres anciens donne une ouverture à de multiples disciplines. Outre la littérature, l'étude des illustrations et des représentations sur la vision du monde peut être réalisée en art plastique, le contenu appréhendé en sciences ou en géographie (zodiaque, longitude, latitude), la conservation des livres vue par le documentaliste. Selon l'équipe formée, il sera possible d'aborder la mythologie, d'étudier des poèmes et/ou des chansons et musiques en rapport avec des astres ou des voyages spatiaux (science-fiction), de réaliser les volvelles d'Apian pour se repérer géographiquement ou au cours du temps. L'utilisation d'un logiciel comme Stellarium ou GeoGebra pour simuler un modèle est possible.

Place de l'action dans le PEAC

Le parcours peut prendre place dans les heures d'Aide Personnalisée ou d'enseignement d'exploration en seconde (MPS) ou être sujet de TPE en lycée. Pour le collège, il pourrait concerner un EPI, un club d'astronomie ou un atelier scientifique et technique.

À titre d'exemple, voici l'une de ces anciennes volvelles présentes dans l'ouvrage de Pierre Apian et reconvertie en cette interprétation actuelle de Pierre Causeret :



La volvelle Miroir du Monde (Cosmographie, p. 66) et sa version moderne.

* *Un partenariat a été signé entre la BUST et l'ENS-Lyon*

***Le média croisé est accessible et téléchargeable en suivant le lien :* http://tremplin.climatetmeteo.fr/libTremplin#LesVolvellesDApian

■

Solutions des mots croisés

Horizontalement

1. Référentiel. **2.** Animé. ANSI. **3.** Doppler (voir l'article de François Mignard). Don. **4.** IR (infrarouge). Rapide. **5.** Ambitieux. **6.** Le. Si. UC (Unité Centrale). Ni (voir l'article de Xavier Campi). **7.** Lever. Air. **8.** SSO (Swiss Space Office). Essence. **9.** Fissa. Usés.

Verticalement

1. Radiales. **2.** Énorme. SF. **3.** FIP. Loi (de Kepler). **4.** Emprise. **5.** Relatives. **6.** Épi. ESA (European Space Agency : 8 km/s, c'est la vitesse de satellisation minimale). **7.** Rieurs. **8.** Ta. Duc. eu (clea-astro.eu). **9.** Index. Ans. **10.** ESO (European Southern Observatory). Nice. **11.** Linéaires.

Vous souhaitez débuter ou
vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.

Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :

http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie

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, …
HS10 Mathématiques et astronomie (2012)
HS11 Les constellations (2014)
HS12 L'astronomie à l'école (2016)

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 Ecoles d'Eté 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

http://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 :

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

Siège social :

CLEA, c/o CAPE
case courrier 7078
Université Paris Diderot
5, rue Thomas Mann
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :
daniele-imbault@laposte.net

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 2017 :	**10 €**
Abonnement CC pour 2017 :	**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 161 printemps 2018