

AstroMath

les mathématiques de l'astronomie

Bernard LELARD

Association d'astronomie VEGA

Commission de cosmologie de la SAF

41

« la vue est plus prompte que l'ouïe »

Ainsi proclamait déjà Empédocle d'Agrigente vers 455 avant JC lorsqu'en Sicile il observait les orages. J'observe tous les jours le même phénomène à Nice à midi pile lorsqu'une fumée blanche apparaît sur la colline du château 3 secondes avant le coup d'un célèbre canon. Empédocle disait aussi que la lumière du Soleil traverse l'espace avant d'arriver à l'œil. Certes Empédocle était excentrique. Nietzsche disait de lui qu'il était « la figure la plus bariolée de la philosophie antique ». Il s'habillait de vêtements de pourpre avec une ceinture d'or, des souliers de bronze et une couronne delphique. Il portait des cheveux longs, se faisait suivre par des esclaves, et gardait toujours la même gravité de visage. Quiconque le rencontrait croyait croiser un roi, disait Favorinus d'Arles, élève d'Epictète. Selon la légende, alors qu'il mourut dans le Péloponèse, se précipitera en 435 av JC dans le foyer ardent de l'Etna, laissant une sandale sur le bord du volcan en signature de suicide, à moins qu'il ne fut victime, comme Pline, d'une éruption de volcan vue de trop près. .



Aristote, pour qui la lumière est une propriété des objets et non des mouvements, mit les thèses d'Empédocle sous son éteignoir. Pourtant le sage d'Agrigente dans sa poésie cosmologique chantait:

« Connais premièrement la quadruple racine

« De toutes choses : Zeus aux feux lumineux, (**le feu**)

« Héra mère de vie (**la Terre**), et puis Aidônéus (**l'air**),

« Nestis (**Poséidon, l'eau**) enfin, aux pleurs dont les mortels s'abreuvent.

Empédocle énonçait donc les 4 éléments. Aristote rectifia l'ordre de la série : « Feu, Air, Eau, Terre », séquence si juste que l'astrophysicien Morbidelli n'aurait pas renié dans son « **Modèle de Nice** » (à leur naissance les planètes sont liquides incandescentes, le gaz initial

de la nébuleuse primordiale devient les géantes gazeuses, les astéroïdes mouillés et les comètes apportent l'eau et vint enfin les planètes telluriques par déplacement des géantes gazeuses qu'elles tirent vers l'extérieur par résonance). Hélas Aristote ajouta « l'Éther » pour combler l'Univers, éther que dézinguère l'interféromètre de Michelson et Morley en 1887, précipitant ainsi Einstein dans la relativité. L'Eglise, hélas jusqu'au XVII^{ème} siècle, se rallia aveuglément aux thèses d'Aristote amplifiées par les commentaires de Saint Thomas d'Aquin. La lumière viendra de Galilée, du pape Urbain VIII et de ses successeurs.



Monnaie Urbain VIII

collection B.LELARD

Le monde musulman retrouve, au XI^{ème} siècle, l'idée d'Empédocle avec Ibn Sînâ, (Avicenne), l'astronome persan Al Biruni, et surtout Ibn al Haytham, (Alhazen), qui dans ses différents traités d'optique, pose le problème sous sa forme moderne, **en séparant la propagation de la lumière et la vision des objets**. Au XIII^{ème} siècle John Pecham et Roger Bacon actualisent les idées du fantasque Empédocle. Bacon écrit dans ses « Perspectiva » :

« *Si ergo lucis multiplicatio est in instanti et non in tempore erit instans sine tempore quia tempus non est sine motu. Sed impossibile est instans esse sine tempore sicut nec punctum sine linea* »

« Si donc la propagation de la lumière se faisait instantanément et non temporellement, il y aurait instant sans temps, parce que le temps n'existe pas sans mouvement. Mais l'instant sans le temps est aussi impossible que le point sans la ligne ». Képler, tout de même, et Descartes croyaient fermes que la lumière est instantanée en diminuant d'intensité selon le carré inverse de la distance.

Galilée fut le premier à vouloir mesurer cette vitesse. Il imagina une expérience, décrite dans *Discours Et Demonstrations Mathematiques Concernant Deux Sciences Nouvelles*. Deux personnes postées à bonne distance l'une de l'autre se font des signaux lumineux, en masquant et démasquant des lanternes, l'un démasquant sa lanterne aussitôt qu'il aperçoit le signal de l'autre lanterne. Il imagina même d'opérer à grande distance, en utilisant des lunettes installées avec les lanternes. Galilée ne mesura rien. Il n'en déduisit pas pour autant que la propagation était instantanée, il en déduisit que si la vitesse de la lumière avait une valeur finie, cette valeur était très grande, et la propagation quasi instantanée à notre échelle.

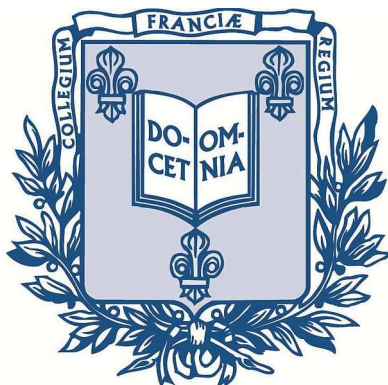
Fermat disait à Descartes, ferme dans son opinion, que Galilée eut été mieux inspiré d'utiliser un miroir plutôt qu'un aide fermant une lanterne, supprimant ainsi le retard dû à son temps de réaction. Cette idée est aujourd'hui évidente, mais à l'époque de Galilée, la qualité des miroirs n'aurait probablement pas permis l'expérience et Galilée n'aurait probablement pas réussi à collimater correctement. Mais cette idée d'un aller et retour après réflexion fut utilisée par Mersenne pour mesurer la vitesse du son, à l'aide de son écho.

L'idée du miroir fut reprise deux siècles plus tard (avec celle de la lunette), dans la méthode de la roue dentée par Fizeau, avec un miroir tournant, par Foucault à Paris, puis par Cornu et Perrotin à l'Observatoire de Nice.



Galilée a aussi essayé, sans succès, d'utiliser déjà **les mouvements des satellites de Jupiter** qu'il venait de découvrir et leurs rapides durées de rotation. La tâche de Jupiter réapparaissait toutes les 9 heures. Il fut le premier à remarquer que ces mouvements pouvaient donc être une **horloge naturelle infaillible** et visible par tous sur terre et surtout sur mer. Le problème de la mesure de la longitude se posait pour les marins craignant les récifs et l'apparition soudaine des côtes. Cette imprécision compliquait les traversées océaniques des Espagnols vers les Amériques. Mais Galilée n'avait pas pour ses mesures d'horloge terrestre, Huygens n'inventera le pendule oscillant qu'en 1657. Le roi d'Espagne, lassé des pertes en mer de ses galions, promit une forte somme à qui trouverait une méthode de calcul de longitude. Galilée se lança dans les relevés des éclipses de « ses » satellites, méthode qui sera reprise par Cassini, puis Roemer.

L'abbé Picard est l'un des 21 premiers académiciens français. Il est né à La Flèche le 21 juillet 1620. Professeur d'astronomie au Collège Royal (dénommé Collège de France depuis 1870), remplaçant Gassendi en 1655, il va travailler en 1667 avec l'astronome Adrien Auzout (1622, 1691), membre fondateur de l'Observatoire Royal. Il invente la lunette de visée géodésique avec laquelle il va mesurer le rayon de la Terre par la mesure de l'arc méridien sous tendu par un angle de un degré entre Paris et Sourdon (à 20 km d'Amiens). Par triangulation (imaginée par Gemma Frisius) il va trouver entre 111 et 112 km pour un degré de latitude, ce qui donne un rayon terrestre de 6.372 km (valeur actuelle : 6.371 km). Hors la quasi exactitude ce fut une première mondiale en terme de géodésie. Cette mesure est à l'origine de la nouvelle carte de France commandée par Cassini (« vous avez rétréci mon royaume » s'exclama Louis XIV ». Deux obélisques commémorent l'événement à Juvisy et à Villejuif.



devise du Collège : « Docet Omnia : j'enseigne tout »

devise nécessaire car les premiers cours se limitaient au grec et à l'hébreu.

L'astrophysique y est enseigné par Antoine Labeyrie, les mathématiques par : Alain Connes, Jean Christophe Yoccoz, Don Zagier, Pierre-Louis Lions, Gérard Berry. AstroMath est plutôt math.

En 1671 Cassini, Auzout, Picard, Huygens et Roberval montent des programmes d'observations et de recherches, notamment le calcul de la différence de longitude entre Paris l'Observatoire et Uraniborg afin d'utiliser les relevés de Tycho Brahé. Cassini va rester à Paris pour observer les immersions de Io dans le mouvement de Jupiter d'octobre 1671 à janvier 1672 en espérant la météo favorable et les éphémérides exactes.

Picard part donc seul au Danemark avec pour mission le relèvement de l'Observatoire d'Uraniborg de Tycho Brahé sur l'île de Hven en face de Copenhague. Il va écrire un livre sur son voyage et ses mesures. Il arrive à Copenhague le 24 août 1671 et part le 6 septembre pour Hveen. Il est alors accompagné par Erasme Bartholin et d'un jeune danois, Ole Roëmer. Picard écrira : « Olaüs Roemer, que Bartholin m'a fait connaître, et qui, étant ensuite venu en France avec moi, fut nommé membre de l'Académie des Sciences, où il a donné plusieurs marques de son rare génie et de son esprit ».

Roemer est né à Aarhus le 25/09/1644. Le vrai nom de son père était Christian Pedresen qu'il changea en Roemer car il venait de l'île de Romo. Olaus, qu'on appelait Ole, fait des études de sciences exactes à la vielle « KatedralSkole » d'Aarhus puis à l'Université de Copenhague en 1662. Il loge chez Erasmus Bartholin (dont il épousera la fille à son retour de France). Il devint naturellement l'assistant de Bartholin alors professeur de mathématiques et de médecine. Bartholin, qui venait de découvrir la double réfraction, va l'initier aux mathématiques en lui confiant la tâche de compiler les observations et le catalogue des étoiles de Tycho Brahé en vue de leur publication demandée par

le roi Christian V. En effet celui ci venait de racheter au fils de Képler les manuscrits des mesures de Tycho Brahé devenu gloire nationale malgré son exil final à Prague.



Roemer va assister Picard lors d'éclipses qui serviront à déterminer la différence de longitude entre Hveen et Paris. Picard, malade du scorbut rentre à Copenhague, confié à Roemer le soin

de finir le travail qu'il accomplit avec une grande précision. Picard décide d'emmener Roemer avec lui à Paris à l'été 1672 et le loge au nouvel Observatoire. Roemer va participer activement aux premiers travaux de l'Académie Royale des Sciences. Il participe avec Picard aux observations des satellites de Jupiter sur la parallaxe de Mars.



Lorsque en 1675 Cassini revisitant ses observations faites en Italie et ses tables d'observations des satellites de Jupiter il constatait des écarts significatifs qu'il attribuait dans un premier temps aux lois de Képler montrant des excentricités plus grandes de la Terre ou Jupiter. Cassini avait aussi émis l'idée d'un « **mouvement successif de la lumière** ». Cette inégalité dans les observations, écrit-il, « **paroit venir de ce que la lumière emploie quelques temps à venir du satellite jusqu'à nous, et qu'elle met environ dix à onze minutes à parcourir un espace égal au demi diamètre de l'orbite terrestre** ».

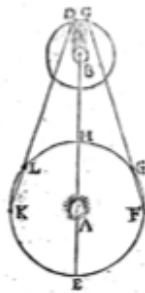
Roemer reprend l'idée de Cassini, affine les observations, calcule la vitesse de la lumière et devient célèbre, avec toutefois une ambiguïté : Cassini avait trouvé le moyen avant Roemer de mettre en évidence la vitesse de la lumière. Cassini, comblé, laisse la gloire à Roemer. La question est encore ouverte : en 2008 (!) un manuscrit de Cassini retrouvé par James Lequeux montrerait que Cassini se considérait comme à l'origine de la découverte (article publié dans « Journal of Astronomy History and Heritage », tout de même.

Le 7 décembre 1676 Roemer écrit dans le « Journal des Sçavants » :

**DEMONSTRATION TOVCHANT LE
mouvement de la lumière trouvé par M. Rømer de
l'Academie Royale des Sciences.**

IL y a long-temps que les Philosophes font en peine de decider par quelque experience, si l'action de la lumiere se porte dans un instant à quelque distance que ce soit, ou si elle demande du temps. Mr Rømer de l'academie Royale des Sciences s'est avisé d'un moyen tiré des observations du premier satellite de Jupiter, par lequel il démontre que pour une distance d'environ 3000 lieues, telle qu'est à peu près la grandeur du diamètre de la terre, la lumiere n'a pas besoin d'u-

1676. N n n



Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier Satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour en sortir en D, & soit EFGHKL la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la terre estant en L vers la seconde Quadrature de Jupiter, ait veu le premier Satellite, lors de son émerision ou sortie de l'ombre en D; & qu'en suite environ 42. heures & demie après,

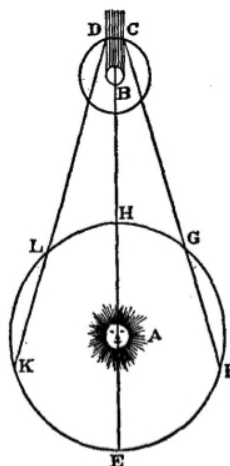
scavoir après une revolution de ce Satellite, la terre se trouvant en K, le voye de retour en D: Il est manifeste que si la lumiere demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le Satellite sera veu plus tard de retour en D, qu'il n'auroit esté si la terre estoit demeurée en K, de sorte que la revolution de ce Satellite, ainsi observée par les Emerisions, sera retardée d'autant de temps que la lumiere en aura employé à passer de L en K, & qu'au contraire dans l'autre Quadrature FG, où la terre en s'approchant, va au devant de la lumiere, les revolutions des Immerisions paroistront autant accourcies, que celles des Emerisions avoient paru alongées. Et parce qu'en 42. heures & demy, que le Satellite employe à peu près à faire chaque revolution, la distance entre la Terre & Jupiter dans l'un & l'autre Quadrature varie tout au moins de 210. diametres de la

Terre, il s'ensuit que si pour la valeur de chaque diametre de la Terre, il falloit une seconde de temps, la lumiere employeroit 3; min. pour chacú des intervalles GF, KL, ce qui causeroit une differéce de prés d'un demy quart d'heure entre deux revolutions du premier Satellite, dont l'une auroit esté observée en FG, & l'autre en KL, au lieu qu'on n'y remarque aucune difference sensible.

Il ne s'ensuit pas pourtant que la lumiere ne demande aucun-temps: car apres avoir examiné la chose de plus prés, il a trouvé que ce qui n'étoit pas sensible en deux revolutions, devenoit tres-considerable à l'égard de plusieurs prises ensemble, & que par exemple 40 revolutions observées du costé F, estoient sensiblement plus courtes, que 40. autres observées de l'autre côté en quelque endroit du Zodiaque que Jupiter se soit rencontré; & ce à raison de 22. pour tout l'intervalle HE, qui est le double de celui qu'il y a d'icy au soleil.

La necessité de cette nouvelle Equation du retardement de la lumiere, est établie par toutes les observations qui ont esté faites à l'Academie Royale, & à l'Observatoire depuis 8. ans, & nouvellement-elle a esté confirmée par l'Emerision du premier Satellite observée à Paris le 9. Novembre dernier à 5 h. 35. 45. du soir, 10. minutes plus tard qu'on ne l'eût deü attendre, en la déduisant de celles qui avoient esté observées au mois d'Aoust, lors que la terre estoit beaucoup plus proche de Jupiter; ce que Mr Römer avoit predit à l'Acade-

Il s'agit là d'un des textes scientifiques les plus importants relatant une expérience de l'importance de celle de l'éclipse de Sobral pour la relativité ou celle d'Eratostène pour le calcul du rayon de la Terre, ... et tellement pédagogique.



Sur le schéma ci dessus le petit cercle du haut représente l'orbite de Io autour de Jupiter matérialisé par B, DC est l'éclipse de Io par Jupiter, le gros cercle du bas est l'orbite de la Terre autour du Soleil, les points E F G H L K sont des positions de la Terre au cours d'une année de révolution.

Le Journal des Savants (quel joli nom, aujourd'hui impensable) publie en fait une note de 4 pages (dont les 3 ci dessus) sur les occultations de Io pendant 8 ans (reprenant donc des

mesures de Cassini) avec pour but premier : « *de décider par quelque expérience, si l'action de la lumière se porte dans un instant à quelque distance que ce soit ou si elle demande du temps* ». Il s'agissait d'abord de **répondre aux philosophes** sur le caractère instantané ou non de la propagation de la lumière. Il ne s'agissait donc pas de publier une valeur de la vitesse de la lumière. Par contre toutes les données nécessaires au calcul se trouvent dans la note. Ainsi le diamètre de la Terre : 3.000 lieues (calculé par Picard en 1671 en mesurant le degré terrestre à Paris, durée d'une révolution de Io : 42,5 H, variation de la distance Terre-Jupiter dans le temps d'une révolution de Io : 210 diamètres terrestres, écart de temps entre immersion et émergence, la Terre étant en point opposés H et E : 22 minutes. Soit 11 minutes pour franchir une UA, inconnue à l'époque (la parallaxe du Soleil sera mesurée lors du transit de Vénus de 1761), Roemer écrit : « & ce à raison de 22 pour tout l'intervalle HE, qui est le double de celui qu'il y a d'icy au Soleil » et poursuit : « *La nécessité de cette nouvelle équation du retardement de la lumière est établie par toutes les observations qui ont été faites à l'Académie Royale & à l'Observatoire depuis 8 ans, & nouvellement elle a été confirmée par l'émergence du premier satellite observée à Paris le 9 novembre dernier à 5 h 35 min 45 s du soir, 10 minutes plus tard qu'on ne l'eut deû attendre, en la déduisant de celles qui avoient été observées au mois d'août lorsque la Terre estoit beaucoup plus proche de Jupiter.* »

The image shows two pages of handwritten astronomical data. The left page contains observations from 1673 and 1677, including dates like 'Marsij 20' and 'Janij 25'. The right page is a more detailed table of observations for Io's eclipses, spanning from 1673 to 1677. It lists dates such as 'Oct 22', 'Jan 3', 'Jan 10', etc., and includes times for 'Immer' (immersion) and 'Emer' (emergence). The handwriting is in French and includes various numerical values and annotations.

Relevé de mesures de Roemer : les apparitions de Io sont sur les colonnes de droite

Plutarque Roemer écrira dans son livre « Adversaria » que la lumière met une minute pour traverser 1.091 diamètres terrestres. Il indique aussi que le grand cercle de la Terre est de 57.060 toises (6.372 km) mesurées par Picard en 1671, la distance Terre-Soleil étant calculée par parallaxe à 13.787 rayons terrestres. Sur ces bases la vitesse serait calculée à 139.437 km/s, ce qui est exceptionnel pour l'époque car cela donne une idée du phénomène.



Plaque commémorative située à droite de l'entrée principale de l'Observatoire de Paris et Tour Rundetarn à Copenhague.

Comme lors d'une découverte fondamentale (Cf la découverte en 1995 de Mayor et Queloz de la première exoplanète qui déclencha soudain une série continue de découvertes et de lancement de satellites), l'article de Roemer va aussi déclencher une course de recherches pour approcher la vraie valeur. Ainsi Roemer lui même prédira l'arrivée de l'émergence de Io en septembre 1667 avec un retard de 11 minutes, puis 7, en utilisant les tables de Cassini faisant office d'éphémérides. Cassini et Newton s'essayeront à ces prédictions qui devinrent des expériences à la mode. Delambre se basant sur un millier d'éclipses de Io sur 140 ans arrive à 8,13 mn (vraie valeur : 8,19 mn).

En 1681 Roemer rentre au Danemark et se marie avec la fille de Bartholin. Il devient professeur d'astronomie à l'Université de Copenhague et poursuit ses observations à la Tour Rundetarn. Ses papiers ont brûlé lors du Grand Feu de Copenhague en 1728 et son assistant, Peder Horrebow, retranscrira de mémoire ses principales. En 1683, en tant que Mathématicien royal, Roemer fixera un nouveau système de mesures pour le Danemark (premier système national unifié) et introduit aussi le calendrier grégorien. En 1708 Roemer se casse la jambe, immobilisée dans de la glace. Fahrenheit lui rend visite et à partir d'une idée de Roemer dès 1701, déduite des recherches de Galilée dont ses essais de thermomètres et de baromètre se réduisaient à 2 points significatifs (gel et bouillonnement d'un liquide supportant une pression (alcool)), imagine une méthode et un instrument qui seront appliqués encore de nos jours dans de nombreux pays anglo saxons. Celsius ne verra le jour qu'en 1701.

Roemer sera aussi Chef de la Police de Copenhague, essayant de contrôler les marginaux du port il fait installer le premier éclairage public et conçoit un plan urbain avec des rues à angle droit permettant des interventions rapides des pompiers, corps qu'il vient de créer. Il agrmente la ville de rues pavées et de jardins publics, préfiguration de la Copenhague moderne. Il meurt en 1710 à l'âge de 65 ans.



Roemer en billet de banque avec son observatoire, la Tour Rundtarn

La première mesure de la lumière indépendamment d'une autre mesure (éclipses) sera faite par Fizeau en 1829 entre Suresnes et Montmartre avec un banc de roue dentée. Il trouvera 315.000 km/s. La mesure sera affinée par Gustave Froment avec un dispositif semblable à 720 roues dentées. En 1862 Léon Foucault avec un banc à miroir tournant trouve 298.000 km/s. Alfred Cornu en 1870, avec aussi un montage à roues dentées entre l'Ecole Polytechnique et le Mont Valérien puis entre l'Observatoire et la tour de Montlhéry, trouve 300.400 km/s.

Suivront Michelson (1878, 300.140 km/s), Newcomb (1882, 299.853 km/s), Henri Perrotin, nouveau directeur de l'Observatoire de Nice (1898 et 1902 avec l'appareil de Cornu : 299.880 km/s sur des distances de 12 et 46 km), Michelson en 1926 sur 35 km entre le Mont Wilson et Pasadena trouve 299.796 +4 km/s avec l'intervalle de précision actuel. En 1930 Michelson fait construire à Pasadena un tube d'acier de 1 mile de long mais meurt entre temps.

Après la Seconde Guerre Mondiale la course à la lumière repart avec de nouveaux outils : 1947 Essen avec un guide d'onde trouve 299.792,4 +- 3 km/s, 1949 Aslakson avec un radar affine à 299.792,4 +- 2,4 km/s. Tout se joue avec l'intervalle de confiance : Froome en 1958 avec un radio interféromètre à ondes millimétriques affine encore : 299.792,4574+-0,0011 km/s.

1972 voit l'arrivée du laser avec Kenneth Evenson utilisant un laser hélium-néon stabilisé. Le résultat est 299.792,4574+-0,0011 km/s. La 15^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures prend acte de 299.792.458 m/s pour une corrélation avec d'autres unités de mesure en vue d'une redéfinition du mètre étalon et/ou de la seconde.

En 1978 Woods, Shotton et Rowley avec un dispositif du même type que celui d'Evenson avec un meilleur environnement expérimental trouvent : **299.792,45898+-0,0002 km/s**, donc avec une précision supérieure à celle du mètre étalon alors en vigueur. En 1983 la 17^{ème} Conférence générale des poids et mesure fixe la définition du mètre :

le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299.792,456 s.

Ainsi cette splendide découverte va permettre aux astronomes de voir dans le passé et en photographiant le ciel d'obtenir les images de l'histoire de l'Univers en tranches d'époques au point de voir des galaxies qui n'existent plus et des toutes premières briller dans l'infra rouge.

Bernard LELARD

La version imprimable peut m'être demandée à

bernard.lelard@gmail.com