

L'histoire de la vitesse de la lumière

Robert Garnier, observatoire de Lyon
avec la complicité de Georges Paturel

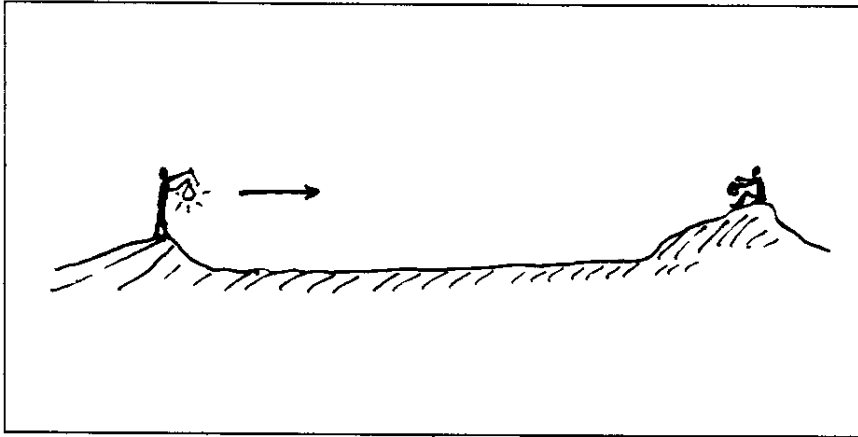
Nous publions cette passionnante histoire sous forme de feuilleton. Le premier épisode est consacré aux mesures du XVII^e et du XVIII^e siècles dominées par Römer et Bradley.

Il serait sans doute difficile de répondre à la question de savoir depuis quand les hommes savent que la lumière se propage. Après tout, que la lumière soit en mouvement n'est pas une évidence pour quiconque observe la nature. Au contraire s'il tombe sous le sens que la lumière solaire, par exemple, baigne notre environnement, il n'est par contre pas du tout évident que quelque chose se propage du Soleil jusqu'à nous. On objectera peut-être qu'à la suite de Démocrite, un certain nombre de «physiciens» admettent que la lumière est constituée de jets de particules de diverses couleurs se déplaçant en ligne droite et que s'il y a quelque chose en mouvement, ce mouvement implique l'idée de vitesse. Mais ce serait oublier qu'à cette époque le concept de vitesse reste extrêmement flou. Il suffit pour s'en convaincre de se rappeler les fameux «paradoxes» de Zénon d'Elée.

Il ne semble pas que l'on se soit posé de question concernant la vitesse de la lumière avant la fin du seizième siècle ou le début du dix-septième. Peut-être allait-il de soi que cette vitesse était infinie ? Toujours est-il que c'est à cette époque qu'apparaissent deux «écoles», l'une qui affirme que la lumière se propage avec une vitesse infinie et à laquelle

se rallient Johannes Kepler (1571-1630) et René Descartes (1596-1650), l'autre attribuant à la lumière une vitesse finie et dont Galileo Galilei dit Galilée (1564-1642) se fait le champion. Quoi qu'il en soit, ces positions ne reposent que sur «l'intime conviction» de ceux qui les adoptent et non sur une approche expérimentale, et pour cause puisque nous n'en sommes alors qu'à l'aube de l'expérimentation en matière de science et que comme nous le verrons, les moyens de l'époque ne permettent pas de trancher entre les deux hypothèses.

Il convient de souligner que l'Optique n'en est alors qu'à ses débuts. Il s'agit avant tout d'une Optique Géométrique reposant uniquement sur l'hypothèse de l'existence de rayons lumineux et sur les lois de Snellius-Descartes. Or ces hypothèses ne font appel à aucune supposition concernant tant la manière dont la lumière se propage (à l'époque c'est la théorie des corpuscules de lumière qui prévaut) que sa vitesse de propagation. Cette dernière question, si elle n'avait trouvé sa solution antérieurement, ne se serait posée de manière incontournable que lors des premiers développements de l'Optique Physique, c'est-à-dire au début du dix-neuvième siècle.



1 - Galilée tente la première détermination de la vitesse de la lumière.

Si nous ignorons la raison pour laquelle Galilée suppose que la vitesse de la lumière est finie, nous connaissons par contre fort bien tous les détails de sa tentative de mesure réalisée en 1638 puisqu'il les décrit dans son «Discours sur deux sciences nouvelles» publié à Leyde au soir de sa vie alors qu'il vit retiré à Arcetri où l'Inquisition l'a assigné à résidence.

L'expérience est extrêmement simple. Deux opérateurs que nous appellerons A et B se trouvent chacun sur le sommet d'une colline, la distance qui les sépare étant voisine de 1 kilomètre et demi selon certains auteurs, de 3 kilomètres selon d'autres. L'un et l'autre sont munis d'une lanterne qu'ils masquent avec leur main. A écarte brusquement sa main de manière que B voit la lumière émise par la lanterne de A. Dès que B perçoit ce signal lumineux, il démasque à son tour sa propre lanterne. A note le temps écoulé entre le moment où il a écarté sa main et celui où il reçoit le signal de B. En divisant la distance de 3 kilomètres par le temps ainsi mesuré, Galilée en déduit la vitesse de propagation de la lumière.

Il est clair que le temps de réaction des deux opérateurs lors de la perception des signaux lumi-

neux est considérable devant celui mis par la lumière pour franchir une distance de 3 kilomètres et qui est de 10 millièmes de seconde. Galilée en a parfaitement conscience et après avoir longuement fait «répéter» les deux opérateurs, il note ces temps de réponse de manière à corriger sa mesure, après quoi il trouve que la vitesse de la lumière est infinie. Il est trop fin expérimentateur pour ne pas saisir le peu de fiabilité de sa méthode et le peu de signification du résultat obtenu. Il laisse encore la porte ouverte en disant que si la vitesse de la lumière n'est pas infinie, elle est du moins trop grande pour être mesurable. Bien qu'elle ne permette pas de trancher la question de la finitude de la vitesse de la lumière, l'expérience de Galilée a au moins le mérite de montrer que dans l'hypothèse selon laquelle cette vitesse est très grande sans pour autant être infinie, on n'a le choix qu'entre deux solutions : ou bien on allonge le trajet lumineux, ou bien il faut être en mesure d'estimer avec une grande précision des intervalles de temps très courts.

2 - La vitesse de la lumière a une valeur finie.

Ce n'est certes pas un amour débordant pour la science qui, à l'instigation de Colbert, conduit Louis XIV à fonder l'Observatoi-

re de Paris en 1667. Le célèbre ministre a en effet d'autres idées en tête puisqu'il a, pour des raisons d'ordre commercial, décidé d'édifier un empire colonial, ce qui a pour conséquence immédiate de mettre la France en concurrence avec l'Angleterre qui possède depuis bien longtemps déjà une solide vocation maritime. Il lui faut donc disposer à la fois d'une flotte commerciale et d'une flotte de guerre capables d'affronter avec succès les escadres anglaises. A l'époque l'une des difficultés majeures rencontrées par ceux qui, à bord des navires, ont charge de faire le point est de connaître l'heure avec une précision suffisante. Bien que Christian Huygens (1629-1695) ait significativement amélioré les performances de l'horloge à balancier, l'encliquetage à rochet est encore inconnu et les «garde-temps» n'offrent pas une fiabilité suffisante. La meilleure des solutions consiste encore à s'adresser aux phénomènes célestes et pour cela il faut disposer de bonnes éphémérides. Mais qui serait capable de les établir, sinon un bon astronome muni de bons instruments et travaillant dans un bon observatoire ? La construction de l'Observatoire de Paris s'achève en 1672 et l'Angleterre ne tarde pas, pour la même raison, à imiter la France puisque cinq années plus tard, son souverain Charles II ordonne l'érection de celui de Greenwich.

Rien ne destinait a priori Ole Römer (1644-1710) à attacher son nom à la première détermination de la vitesse de la lumière et même rien ne lui aurait laissé supposer qu'un jour il travaillerait à l'Observatoire de Paris sous la houlette du premier Cassini. Compatriote de Tycho Brahé, il commence très jeune sa carrière d'astronome par un véritable travail d'archiviste :

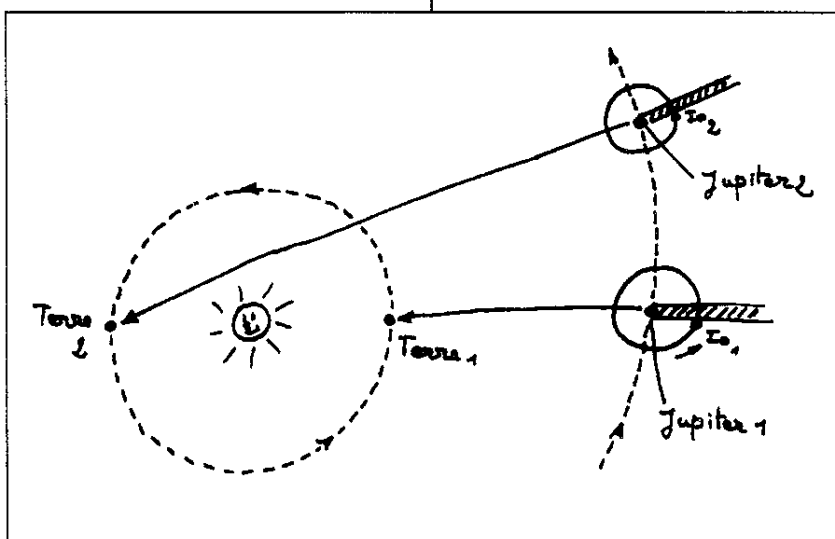
il est chargé de classer les manuscrits de son illustre prédécesseur. Il travaille donc dans son Danemark natal lorsqu'en 1671, il fait la connaissance de l'abbé Jean Picard, un élève de Gassendi qui se trouve en mission dans ce pays afin de déterminer la longitude et la latitude exactes de l'ancien observatoire de Tycho Brahé à Uraniborg et d'y mesurer la longueur du pendule y battant la seconde. L'idée sous-jacente est d'utiliser cette longueur comme «unité de mesure universelle». Séduit par la personnalité du jeune Römer, Picard lui conseille de se rendre à Paris où s'achève la construction de l'Observatoire. Römer accepte et arrive à Paris où il devient, pour des raisons que nous ignorons, précepteur du Dauphin auquel il enseigne les mathématiques. A ce qu'il semble, il ne rejoindra qu'ensuite l'Observatoire qu'il quittera en 1681 lorsqu'il sera rappelé au Danemark par le roi Christian V afin d'occuper une chaire de mathématiques à l'Université de Copenhague.

Dès que Perrault en a achevé la construction, l'Observatoire de Paris voit arriver dans ses murs l'élite du monde scientifique d'alors. A côté des observations astronomiques on s'y livre à nombre d'expériences de physique portant sur des sujets aussi

variés que la thermométrie, la chute des corps, la météorologie ou la mesure de la vitesse du son, cette dernière étant effectuée sous la direction de l'abbé Picard. Ne perdant pas de vue que la raison d'être de l'établissement est de fournir des éphémérides à la marine royale, des astronomes au nombre desquels Römer s'attendent à la tâche. Au moins trois raisons militent en faveur du choix des satellites de Jupiter pour établir des éphémérides nautiques. D'abord cette planète se trouve toujours dans des régions du ciel voisines de l'écliptique et pour cela est facilement observable sur tous les océans où évoluent alors les escadres. Ensuite, les satellites de Jupiter sont brillants, donc aisément repérables avec un instrument modeste d'usage commode à bord d'un navire. Enfin les périodes des satellites galiléens de Jupiter sont assez courtes (de 1,77 jour pour Io à 16,69 jours pour Callisto), ce qui fait que leurs occultations par Jupiter sont fréquentes. Si l'on admet que le mouvement de ces astres autour de la planète est keplérien, on dispose là d'un «garde-temps» d'une précision remarquable. Pour établir les éphémérides en question il suffit d'observer les occultations des satellites joviens sur une durée suffisamment longue pour en déduire leur fréquence et être ensuite en

mesure de les prédire. C'est ce fastidieux travail d'observation et d'analyse des données que Cassini confie à Ole Römer.

Au cours des années 1675-1676 Römer porte son attention sur les éclipses de Io. C'est le satellite le plus proche de la planète et donc celui dont la période de révolution est la plus courte (troisième loi de Kepler). Il ne tarde pas à découvrir que le rythme des éclipses de Io présente des irrégularités et que l'écart entre une éclipse prédite et celle réellement observée peut atteindre dans certains cas 22 minutes. En fait on sait aujourd'hui que l'écart maximal qu'il pouvait observer n'est que de 17 minutes environ (16 minutes et 42 secondes pour être plus précis). Plusieurs historiens ont écrit que Römer donne pour cet écart maximal cette valeur de 17 minutes. C'est inexact ; pour des raisons non précisées dans la littérature, il se trompe bel et bien de 5 minutes mais cela ne change pas grand chose à l'histoire. Il remarque d'autre part que la distribution des écarts mesurés n'est pas aléatoire et que les éclipses sont d'autant plus en avance sur les prévisions que la distance séparant la Terre de Jupiter est plus petite et d'autant plus en retard que cette distance est plus grande. Römer comprend que le phénomène ne peut s'expliquer que s'il admet que la lumière se propage à une vitesse finie, l'observateur n'enregistrant une éclipse qu'au bout du temps mis par la lumière pour franchir la distance séparant Jupiter de La Terre. Comme, par suite de la rotation des deux planètes autour du Soleil cette distance varie, cela explique les écarts temporels entre les prévisions et les observations¹.



L'histoire officielle prétend que Römer attribue l'écart maximal de 22 minutes au temps qu'il faut à la lumière pour franchir une distance égale au diamètre de l'orbite terrestre et qu'il obtient une mesure de sa vitesse de propagation en divisant cette distance par 22 minutes. On affirme même qu'il aurait trouvé la valeur de 212 000 kilomètres par seconde et nombreux sont les auteurs qui citent cette « mesure de la vitesse de la lumière par Römer ». La vérité est que Römer n'a jamais rien publié de tel. Dans le mémoire² à l'Académie des Sciences qu'il présente le 21 Novembre 1676 il se borne à montrer comment l'observation des satellites de Jupiter met un point final au vieux problème de la finitude de la vitesse de la lumière. Précisons qu'à cette époque, l'intérêt d'une mesure de cette vitesse ne se fait pas encore sentir ; il faudra attendre près d'un siècle pour que François Arago devenu directeur de l'Observatoire de Paris en fasse, pour des raisons que nous préciserons alors, l'un des impératifs majeurs de la physique.

Comme cela arrive souvent lorsque se fait jour une idée nouvelle dans un domaine scientifique, le résultat de Römer est accueilli avec plus de circonspection que d'enthousiasme. Si l'on excepte Isaac Newton, la majorité de ses contemporains restent fidèles à une lumière se propageant instantanément. Pour la petite histoire, il est intéressant de souligner qu'au nombre de ses détracteurs Römer a la surprise de compter son propre Directeur Jean-Dominique Cassini qui, après avoir cru un moment à la possibilité d'une vitesse de propagation de la lumière finie, rejette finalement l'idée de son mouvement. Bien sûr ce ne sont pas les observations de Römer qui sont remises en cause, mais l'interprétation qu'il donne des écarts entre les prévisions des

éclipses et leurs observations. D'aucuns imaginent que ce phénomène pourrait s'expliquer en admettant que les orbites des satellites galiléens présentent de très grandes excentricités, d'autres n'imaginent rien du tout et préféreraient invoquer une cause encore inconnue. Et pendant une cinquantaine d'années chacun campe sur ses positions.

Aujourd'hui, alors que la mesure précise de la vitesse de la lumière au laboratoire n'est plus considérée comme un exploit, sa détermination à partir de l'observation des occultations des satellites de Jupiter ne présente guère plus qu'un intérêt historique. Les valeurs les plus récentes obtenues par cette méthode trouvées dans la littérature font état d'une vitesse de 298 800 kilomètres par seconde. C'est un résultat approché à 0,3% par défaut. Il est d'ailleurs peu probable qu'on puisse l'améliorer dans un avenir proche car cette précision somme toute médiocre au regard de celle fournie par les mesures de laboratoire résulte de l'incertitude sur la valeur des dimensions de l'orbite terrestre.

3 - En découvrant l'aberration de la lumière, Bradley confirme le travail de Römer

Ce milieu du dix-septième siècle est décidément très fertile en rebondissements scientifiques. Depuis un certain temps déjà les étoiles ont cessé d'être des bijoux sertis sur une sphère de cristal tournant autour de la Terre une fois par jour. Si elles ont fini par se muer en autant de soleils, chacune d'elles ne continue pas moins d'occuper une position immuable sur la sphère céleste qu'on appelle pour cela la « sphère des fixes ». C'est à cette époque que le « découvreur » de Römer, l'abbé, Jean Picard (1620-1682) réalise,

en collaboration avec Adrien Auzout (1622-1691) (tous deux appartiennent à la « fournée » des 21 premiers membres de l'Académie Royale des Sciences, fondée à Paris en 1666 par Louis XIV, sur la proposition de Colbert), le micromètre à fils mobiles destiné initialement à la mesure du diamètre apparent des planètes. Puis tous deux remplacent dans les instruments destinés aux mesures angulaires les simples alidades à pinules alors en service par des lunettes munies de leur nouveau micromètre. Ces deux perfectionnements techniques vont dès lors conférer aux mesures angulaires une précision encore inégalée. C'est cette instrumentation améliorée qui permet à Jean Picard puis à d'autres astronomes après lui de détecter un curieux mouvement annuel qui affecte l'ensemble des étoiles observées. Il ne semble pas que Picard poursuive ses investigations plus avant. Il est vrai que ce travail est antérieur à la découverte de Römer et que l'interprétation de tels mouvements aurait alors constitué un problème pour le moins épineux. Cette découverte de Picard mérite cependant d'être soulignée car on attribue souvent la découverte des mouvements des étoiles sur la voûte céleste à Halley. En fait la découverte de Halley date de 1718 et est donc postérieure à celle de Picard ; d'autre part, elle concerne le mouvement propre des étoiles qui n'a rien de périodique et donc rien à voir avec la découverte de Picard.

C'est sans doute bien avant le dix-huitième siècle que l'on a acquis la conviction qu'en dépit des apparences, la voûte céleste pouvait avoir une profondeur, c'est-à-dire que toutes les étoiles ne se trouvent pas à une même distance du Soleil. Il pouvait en effet sembler évident qu'une étoile est d'autant plus proche qu'elle est plus brillante.

Mais on savait aussi que par suite de la rotation de la Terre autour du Soleil, les étoiles les plus proches ne doivent pas se projeter toujours à la même place sur le fond stellaire constitué par les plus lointaines mais décrire annuellement des petites orbites elliptiques.

Ce n'est qu'une simple question de géométrie et le fait que ce déplacement apparent des étoiles proches sur la sphère des fixes connu aujourd'hui sous le nom de «parallaxe» ne puisse pas être mis en évidence ne laissait pas d'intriguer les astronomes, fussent-ils les coperniciens les plus convaincus. Il est clair que si, dès la publication par Nicolas Copernic (1473-1543) de son modèle héliocentrique, on avait été en mesure d'observer ce phénomène, l'héliocentrisme n'aurait pas mis près d'un siècle pour s'imposer définitivement. On imaginait mal à l'époque que les étoiles les plus brillantes, donc les plus proches, puissent être encore suffisamment lointaines pour que leur parallaxe ne soit pas décelable avec les alidades alors utilisées.

L'histoire n'a pas retenu le nom de tous ceux qui au cours de la seconde moitié du seizième siècle et pendant tout le dix-septième tentèrent sans succès de mesurer les parallaxes stellaires. En 1726 James Bradley (1693-1762) qui succédera plus tard à Halley dans ses charges d'Astronome Royal et de directeur de l'Observatoire de Greenwich reprend en collaboration avec son ami Samuel Moleynieux (ou Molyneux) le vieux problème de la mesure des parallaxes stellaires. Dans un premier temps, ils concentrent leurs efforts sur la seule étoile Gamma de la constellation du Dragon. C'est un objet qui présente le double avantage d'être brillant et de passer au zénith de Greenwich. Les déplacements angulaires attendus étant très petits, ils s'assurent de la fixité

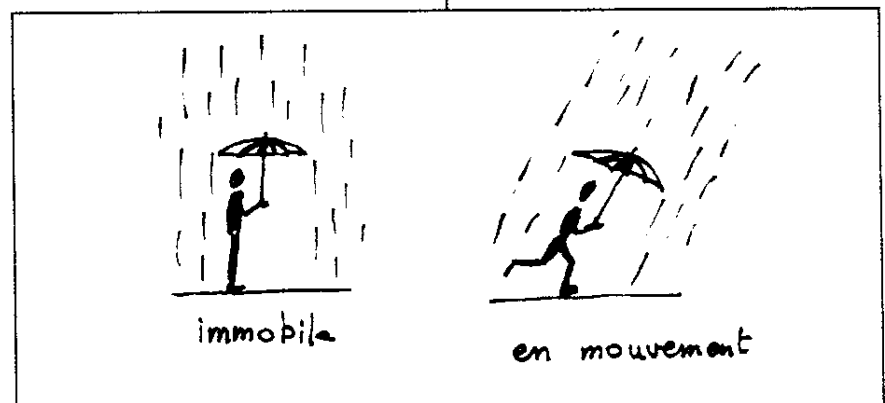
de la direction visée en arrimant solidement leur télescope à une cheminée. Leurs efforts sont couronnés de succès puisqu'ils observent que gamma Draconis décrit bien annuellement une petite ellipse. L'ennui c'est que toutes les étoiles du champ, y compris les plus lointaines, décrivent elles aussi des orbites elliptiques et que ces orbites ont des demi-grands axes ayant tous la même longueur apparente (actuellement cette grandeur est de 20,47 secondes d'arc) alors qu'ils s'attendaient à ce que, conformément aux prévisions, la longueur de ce demi-grand axe soit d'autant plus petite que l'étoile visée est plus lointaine.

Mais ceci ne constitue pas le seul élément de surprise pour Bradley et Moleynieux. En effet la géométrie du problème prévoit que le mouvement parallactique d'une étoile sur la sphère céleste doit, à tout moment s'effectuer dans une direction perpendiculaire à celle du mouvement de la Terre sur son orbite. Or le mouvement observé par Bradley et son compagnon est, à tout instant dirigé suivant la direction du mouvement de la Terre, donc à 90 degrés de la direction attendue. Il leur apparaît clairement qu'il ne peut s'agir là que d'un phénomène inconnu n'ayant rien à voir avec la parallaxe et que Bradley nomme «aberration des étoiles». Aujourd'hui on lui donne le nom d'aberration de la lumière. C'est

seulement un siècle plus tard, en 1838, que Friedrich Bessel (1784-1846) disposera d'une instrumentation suffisamment élaborée pour être en mesure de déterminer la première parallaxe stellaire.

Bradley fournit pour la première fois l'explication du phénomène observé dans une lettre adressée à Halley alors Astronome Royal, datée de Septembre 1728 qui sera lue à la «Royal Society of London» l'année suivante au mois de Janvier. Ses idées concernant la nature de la lumière sont celles héritées de Newton. Pour lui la lumière est constituée d'un courant de particules qui, dans un milieu homogène, se déplacent en ligne droite. Il n'hésite donc pas à leur appliquer la loi de composition des vitesses comme il le ferait pour des gouttes de pluie. En l'absence de vent, un observateur immobile constate qu'elles tombent verticalement. S'il se met à courir, il est surpris de constater que quelle que soit la direction dans laquelle il court la pluie lui arrive toujours de face et que pour ne pas se mouiller, il doit maintenir son parapluie d'autant plus incliné vers l'avant qu'il court plus vite.

Ce phénomène banal n'est pas à imputer à un comportement facticieux de la pluie qui chercherait à importuner les promeneurs mais à un simple théorème de cinématique qui régit la composition des vitesses respectives des gouttes de pluie et du coureur.



Si la Terre était immobile par rapport aux étoiles, Bradley n'aurait rien observé du tout. Somme toute, le résultat qu'il obtient présente un triple intérêt.

Il établit d'une part que la Terre est en mouvement par rapport aux étoiles, les ellipses observées ne pouvant être expliquées que par un mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil. Si, en 1729, il s'était encore trouvé un astronome pour douter du bien fondé de l'héliocentrisme, l'expérience de Bradley aurait dû suffire à le convaincre. En second lieu, si la vitesse de la lumière provenant des étoiles avait été infinie, aucun mouvement apparent de l'ensemble de ces astres sur la sphère céleste tel que celui observé par Bradley n'aurait été décelable. La découverte de Bradley, en ce qu'elle établit la finitude de la vitesse de la lumière confirme donc, et d'une manière indépendante, le résultat obtenu par Römer à partir de l'observation des occultations des satellites de Jupiter. Enfin, force est en effet d'admettre que l'Univers est bien plus vaste que ce que l'on avait soupçonné jusqu'alors puisque malgré la précision des mesures astrométriques atteignant quelques secondes d'arc, la détection des parallaxes stellaires reste encore hors de portée.

Revenons à notre promeneur immobile sous la pluie qui tombe verticalement avec une vitesse V par rapport au sol. Lorsqu'il se met à courir avec une vitesse v dans une direction quelconque, s'il veut éviter de se mouiller, il est obligé d'incliner son parapluie devant lui d'un certain angle α (alpha) par rapport à la verticale. Cela signifie concrètement pour notre coureur que la pluie ne tombe pas verticalement mais arrive dans la direction suivant laquelle il a dû incliner son para-

pluie. Cet angle α est appelé l'angle «d'aberration» de la pluie. Sa mesure est liée aux vitesses V et v par la relation : $\tan \alpha = v / V$.

Imaginons maintenant un observateur qui se trouverait sur le Soleil. En première approximation le Soleil est immobile par rapport aux étoiles et notre homme observerait γ -Draconis par exemple, dans une certaine direction. Si maintenant ce même observateur revient sur Terre, il est entraîné par celle-ci dans son mouvement orbital et il en résulte qu'il se déplace à la vitesse v de la Terre sur son orbite par rapport aux étoiles. Il voit donc γ -Draconis dans une direction différente de celle qu'il avait repérée lorsqu'il se trouvait sur le Soleil. De même que le promeneur devait incliner son parapluie, l'astronome doit, de son côté, incliner son télescope d'un certain angle d'aberration α . Les vitesses c de la lumière et v de la Terre sur son orbite sont liées par une relation identique à celle écrite pour l'aberration de la pluie : $\tan \alpha = v / c$.

Au moment où Bradley découvre et explique l'aberration de la lumière (1728), les estimations des dimensions de l'orbite terrestre se sont singulièrement affinées sous l'impulsion de Cassini, le «patron» de Römer. En 1672, Richer à Cayenne et Cassini, Picard ainsi que Römer à Paris s'attellent à une détermination de la parallaxe de la planète Mars qui doit les conduire par le biais de la troisième loi de Kepler à une réévaluation de la distance Terre-Soleil. Les résultats de cette estimation ne seront publiés que douze ans plus tard, en 1684. Il est intéressant de noter qu'au moment où Römer annonce qu'il a démontré la finitude de la vitesse de la lumière (1676), il ne peut pas avoir connaissance de la révision des

dimensions de l'orbite terrestre qui n'interviendra que huit ans plus tard. Tout au plus peut-il savoir que les premiers prédépouillements indiquent que celles-ci ont été jusqu'ici grossièrement sous-estimées. Par contre en 1728, Bradley utilise une distance Terre-Soleil de 138 millions de kilomètres pour calculer la vitesse v de la Terre sur son orbite. Il mesure l'angle d'aberration α avec une précision qui, pour certaines étoiles atteint 3,5% et dispose alors de tous les éléments lui permettant de calculer la vitesse c de la lumière qu'il trouve égale à 303 000 kilomètres par seconde.

De nos jours la détermination de la vitesse de la lumière à partir de l'aberration des étoiles ne présente plus qu'un intérêt historique. Avec les données les plus récentes, on obtient une valeur de 298 500 kilomètres par seconde. Il s'agit d'un résultat médiocre, la vitesse cherchée étant sous-estimée de 3% environ. Comme pour ce qui a été dit à propos de la «méthode de Römer» la cause en est à rechercher dans une connaissance insuffisante des dimensions exactes de l'orbite terrestre.

Notes de la rédaction

- 1 - voir le TP : "la vitesse de la lumière et Römer" (J. Sert ; CC57).
- 2 - ce mémoire est reproduit dans l'article : " la découverte de la vitesse finie de la lumière par Römer. (M. Bobin ; CC67).

Indications bibliographiques

- 1 - A SPECTACLE IN TWO ACTS WITH A PROLOGUE AND AN EPILOGUE, American Journal of Physics 53 (7), July 1985.
- 2 - RÖMER ET LA VITESSE DE LA LUMIÈRE, table ronde du CNRS, juin 1976 (éd. Vrin 1976).
- 2 - JEAN PICART ET LES DÉBUTS DE L'ASTRONOMIE DE PRÉCISION AU XVIII^e SIÈCLE, colloque du tricentenaire (éd. CNRS 1987).

suite et fin dans le n°84 ■