

AVEC NOS ÉLÈVES

Vitesse de la lumière : Römer revisité.

Francis Berthomieu, Montfort sur Argens

Depuis les travaux d'Albert Einstein sur la Relativité la constance de la vitesse c de la lumière dans le vide joue un rôle essentiel en physique. L'article qui suit propose de retrouver l'ordre de grandeur de la valeur de c en suivant la méthode que Römer a décrite en 1676 dans le « Journal des Sçavants », une démarche qui correspond tout à fait aux attentes des nouveaux programmes de seconde.

1610 - Galilée pointe sa lunette vers le ciel et découvre les satellites de Jupiter. Du 7 janvier au 2 mars, il note avec précision les positions des 4 objets, et rend compte de ses observations dans "Le messenger céleste". Il reconnaît alors n'avoir pas encore déterminé leurs périodes... Quand ce sera fait, il pensera à utiliser cette "horloge" céleste pour aider à la détermination des longitudes, construira son "Jovilabe" (voir CC n° 125), et imaginera d'incroyables dispositifs pour utiliser une lunette astronomique depuis un navire en mouvement...

Pour résoudre le problème des longitudes, il faut établir des tables précises de position des satellites (voir page 9). Cassini, qui dispose d'instruments plus perfectionnés, reprend cette idée en 1668. Pendant l'hiver 1671-72, il s'associe à Picard et à Römer (qui observe depuis Uraniborg, l'observatoire fondé par Tycho Brahé, sur l'île suédoise de Hven), pour effectuer des observations simultanées des éclipses de Io : ils en déduisent la différence de longitude entre Uraniborg et Paris. C'est alors qu'ils découvrent certaines irrégularités dans le mouvement orbital de Io. A partir de 1672, Römer vient travailler aux côtés de Cassini à l'Observatoire de Paris où il poursuit son étude attentive des éclipses de Io.

1676 - Le "Journal des Sçavants" (à retrouver dans sa version originale sur <http://gallica.bnf.fr> - lien direct sur notre site) relate la conclusion de cette étude : la lumière ne se propage pas instantanément...

2010 – Nous proposons ici de relire quelques extraits de ce document, de faire découvrir ces phénomènes à nos élèves à l'aide des éphémérides de notre époque et de voir dans quelle mesure il est possible d'en déduire un ordre de grandeur ou une valeur correcte de la vitesse de propagation de la lumière.

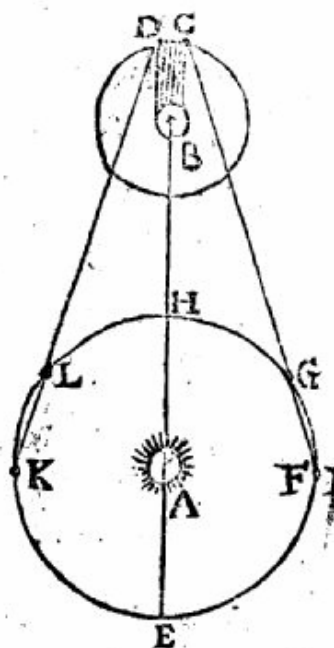


Fig.1. Éclipse de Io avec son commencement en C et sa fin en D

J'utiliserai le schéma que donne le "Journal des Sçavants" pour présenter la situation (figure 1). Autour du Soleil (en A), un cercle représente la trajectoire de la Terre et quelques positions caractéristiques. En particulier, H matérialise la position de la Terre lors de l'opposition de la planète Jupiter, E sa position lors de la conjonction.

Jupiter est en B, avec son cône d'ombre, du côté opposé au Soleil. Le petit cercle qui entoure Jupiter représente la trajectoire de son satellite n°1, Io. Les points particuliers C et D donnent les positions respectives de Io lorsqu'il pénètre dans le cône d'ombre de Jupiter (commencement d'éclipse) et quand il en sort (fin d'éclipse).

Le schéma, fait sans aucun respect d'échelles et en supposant Jupiter immobile, permet néanmoins de bien comprendre que les commencements d'éclipses ne seront observables depuis la Terre, que si celle-ci s'approche de Jupiter, du côté des points F ou G, alors que, lorsqu'elle s'en éloigne, du côté des points L ou K, seules apparaîtront des fins d'éclipses.

Je transcris ci-dessous un premier extrait de l'article :

"Or, supposé que la Terre, étant en L, vers la seconde quadrature de Jupiter, ait vu le premier satellite, lors de son émerision ou sortie de

l'ombre en D, et qu'ensuite, environ 42 heures et demie après, à savoir après une révolution de ce satellite, la Terre se trouvant en K le voie de retour en D : il est manifeste que si la lumière demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le satellite sera vu plus tard de retour en D qu'il n'aurait été si la Terre était demeurée en L, de sorte que la révolution de ce satellite, ainsi observée par les émergences, sera retardée d'autant de temps que la lumière en aura employé à passer de L en K, et qu'au contraire dans

l'autre quadrature FG, où la Terre s'approchant, va au devant de la lumière, les révolutions des immersions paraîtront autant raccourcies, que celles des émergences avaient paru allongées".

L'IMCCE fournit aisément les dates précises des phénomènes concernant Io (<http://www.imcce.fr> / [Éphémérides](#) / [Phénomènes célestes](#) / [Phénomènes des satellites](#)) ainsi que les positions de la Terre et de Jupiter pour toute date de notre choix. Voici les trajectoires de la Terre et de Jupiter en 2010 du 1/01 au 27/12 (un point tous les dix jours), obtenues en quelques clics avec les logiciels "Éphémérides" et "Regressi". On peut situer les positions lors de la conjonction et de l'opposition, mais aussi lors des deux quadratures. Notez que, cette année, le hasard a fait que ces quadratures auront pratiquement lieu aux dates de nos solstices !

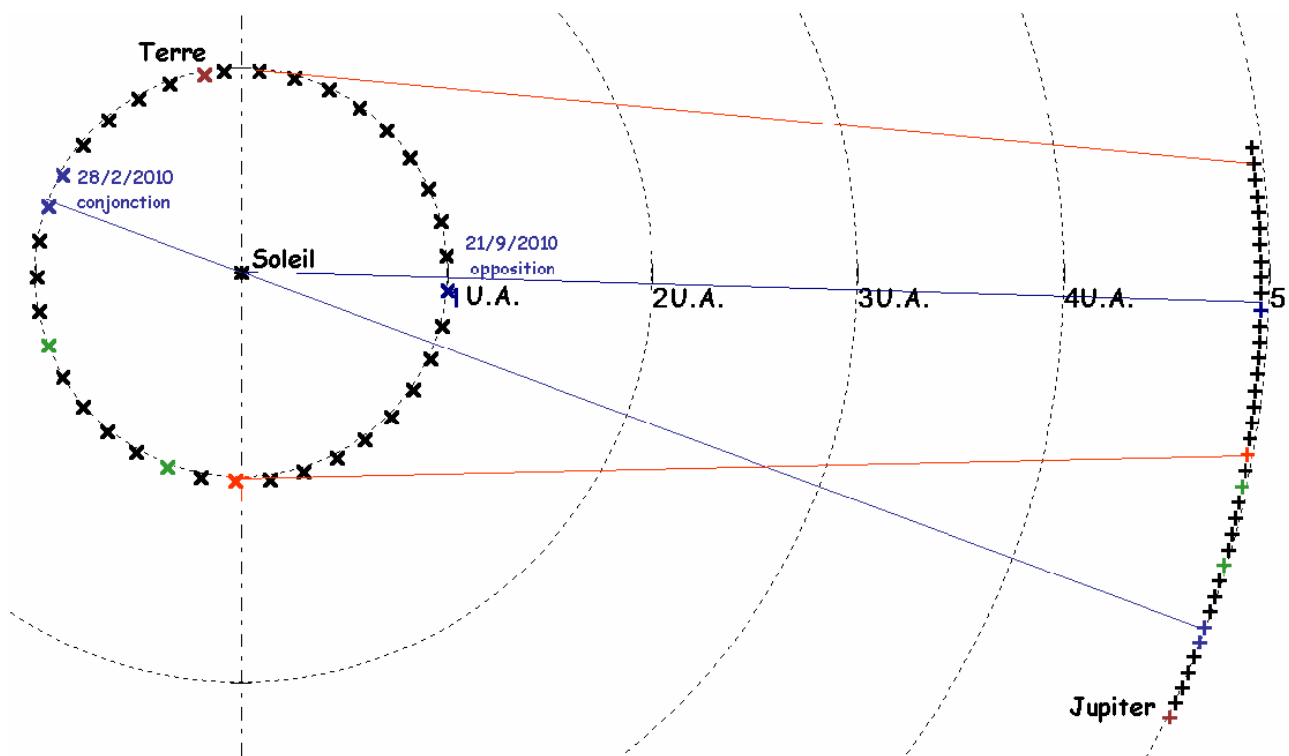


Fig.2. Positions de la Terre et de Jupiter du 1/1/2010 au 27/12/2010 (un point tous les 10 jours)

Le **tableau 1** rassemble quelques-unes des données de l'IMCCE : 11 commencements d'éclipses ont été choisis autour du 20 juin, proches de la première quadrature. Autour de l'opposition du 21 septembre, nous trouvons quelques commencements d'éclipses puis quelques fins. Et lors de la deuxième quadrature (en décembre), nous avons aussi choisi 11 fins d'éclipses. Ces données nous permettront de déterminer la période de révolution de Io autour de sa

planète, et de détecter d'éventuelles irrégularités...

Retrouvons quelques lignes du "Journal des Sçavants" qui nous informe d'une première découverte de Römer : "Après avoir examiné la chose de plus près, il a trouvé que ce qui n'était pas sensible en deux révolutions, devenait très considérable à l'égard de plusieurs prises ensemble, et que par exemple, 40 révolutions observées du côté de F, étaient sensiblement plus courtes que 40 autres, observées de l'autre côté".

Calculons la période moyenne de révolution de Io au moment des quadratures en nous basant sur la durée des 10 périodes que nous avons choisies (au lieu de 40). En juin, nous trouvons 42 h 28 min 30 s mais en décembre c'est 42 h 28 min 52 s. Nous voilà proches des 42 heures et demie de Römer. La précision des éphémérides de l'IMCCE sur l'heure des éclipses est de 0,1 min ou 6 secondes.

date	heure
Éclipses commencements	
11/06/2010	14 :25 :36
13/06/2010	8 :54 :00
15/06/2010	3 :22 :36
16/06/2010	21 :51 :06
18/06/2010	16 :19 :36
20/06/2010	10 :48 :06
22/06/2010	5 :16 :42
23/06/2010	23 :45 :06
25/06/2010	18 :13 :42
27/06/2010	12 :42 :12
29/06/2010	7 :10 :42
Éclipses fins	
13/09/2010	9 :37 :42
15/09/2010	4 :06 :18
16/09/2010	22 :34 :54
18/09/2010	17 :03 :36
20/09/2010	11 :32 :12
Éclipses fins	
22/09/2010	8 :15 :12
24/09/2010	2 :43 :48
25/09/2010	21 :12 :24
27/09/2010	15 :41 :06
29/09/2010	10 :09 :42
Éclipses fins	
10/12/2010	23 :49 :30
12/12/2010	18 :18 :24
14/12/2010	12 :47 :18
16/12/2010	7 :16 :06
18/12/2010	1 :45 :00
19/12/2010	20 :13 :48
21/12/2010	14 :42 :42
23/12/2010	9 :11 :36
25/12/2010	3 :40 :30
26/12/2010	22 :09 :18
28/12/2010	16 :38 :12
30/12/2010	11 :07 :06

Tableau 1

Le fait de déterminer la durée de 10 périodes permet de considérer que les périodes que nous avons obtenues sont connues avec une précision de l'ordre de la seconde : la différence de 12 secondes est donc significative et nous permet de valider la première découverte de Römer !

Revenons au texte original et au développement de l'idée que la lumière ne se propage pas instantanément : "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 et à l'Observatoire depuis 8 ans, et 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'eût dû attendre en la déduisant de celles qui avaient été observées au mois d'août lorsque la Terre était beaucoup plus proche de Jupiter, ce que M. Römer avait prédit à l'Académie."

Nous pouvons suivre la méthode de Römer. En cette année 2010, l'opposition de Jupiter aura lieu en septembre. En utilisant nos éphémérides, il est encore possible de calculer la période de révolution de Io à ce moment là. Nous disposons de quelques commencements d'éclipse avant l'opposition et de quelques fins d'éclipses après l'opposition. Nous obtenons une valeur moyenne de 42 h 28 min 37 s. La première fin d'éclipse qui suit l'opposition aura lieu le 22 septembre 2010 à 8 h 15 min 12 s. Comment prévoir (par exemple) la date et l'heure de la cinquantième fin d'éclipse qui suivra celle-ci ? Tout simplement en ajoutant ... 49 fois la période de 42 h 28 min 37 s. Le calcul vous paraît un peu délicat pour nos lycéens ? Rassurez-vous, c'est un jeu d'enfant avec un bon tableur utilisant des cellules aux formats "date" ou "heure"... Et l'on peut annoncer que la cinquantième fin d'éclipse devrait se produire le 18 décembre 2010 à 01 h 37 min 25 s ! Comparons avec les éphémérides de l'IMCCE : une fin d'éclipse est bien prévue ce jour là, mais ... à 01 h 45 min 00 s, soit 7 min 35 s plus tard ! Nous ne sommes pas loin des 10 minutes de retard annoncées en 1676.

Il semble clair aujourd'hui que Römer n'a pas tenté d'obtenir une valeur de la vitesse de propagation de la lumière. Nous pouvons néanmoins proposer à nos élèves de le faire : Si, entre l'opposition et cette 50^e éclipse, l'observation doit être "retardée" de 7 min 35 s, c'est que la lumière aura passé ce temps à parcourir une certaine distance supplémentaire. À l'opposition, la lumière devra parcourir la distance BH (3,95 UA entre Terre et Jupiter selon l'IMCCE). À la date de cette 50^e éclipse, elle devra parcourir davantage. La distance Terre-Jupiter sera alors 4,87 UA (éphémérides IMCCE) : un supplément de 4,87 - 3,95 = 0,92 UA. Nous avons la chance de mieux connaître la valeur de cette "Unité Astronomique" que notre ami Römer (1,50×10¹¹ m). La vitesse de propagation de la lumière est donc :

$$c = \frac{0,92 \times 1,50 \times 10^{11}}{7 \times 60 + 35} = 3,03 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Une valeur proche, à 1% près, de la valeur "officielle" qui aurait été encore meilleure avec la 54^e fin d'éclipse après l'opposition, celle de la nuit... de Noël : On aurait alors trouvé 2,99×10⁸ m/s... Un vrai cadeau, non ?

Une remarque pour finir : la modélisation de ces phénomènes est extrêmement complexe et Römer le savait bien, lui qui s'était « ...aperçu que le premier satellite de Jupiter était excentrique, et que d'ailleurs ses révolutions étaient avancées ou retardées à mesure que Jupiter s'approchait ou s'éloignait du Soleil, et même que les révolutions du premier mobile étaient inégales ». À méditer !