

La vitesse de la lumière

ou

La méthode de Römer vue comme un effet Doppler-Fizeau

G. Paturel, Observatoire de Lyon

En bref

La lumière a toujours joué un rôle moteur dans l'évolution des idées en physique. La première question qui se posait avec la lumière était la question de sa nature: la lumière était-elle faite de particules ou était-elle une onde associée à un phénomène vibratoire, comme le son ? La question s'est résolue de manière étrange : la lumière est à la fois onde et corpuscule (photon).

La deuxième question concernait la vitesse de propagation de la lumière. Les premières tentatives pour estimer la vitesse de la lumière furent entreprises par Galilée au XVII^e siècle. Galilée s'était placé sur une colline avec une lampe couverte. Un de ses élèves s'était placé avec une lanterne semblable sur une colline voisine. Galilée devait dévoiler sa lanterne et mesurer le temps qu'il fallait à la lumière pour revenir vers lui après que son acolyte l'ait renvoyée. La lumière semblait revenir instantanément. Galilée ne conclut pas, comme certains le pensaient à l'époque, que la lumière avait un déplacement instantané. Il conclut, subtilement, que la vitesse de la lumière était trop grande pour être mesurée. C'était vrai à cette époque. Les progrès de la technique aidant, la vitesse de la lumière, que l'on note souvent "c", fut mesurée comme étant égale à :

$$c = 299792,5 \text{ km/s (dans le vide)}$$

La lumière peut faire sept fois et demi le tour de la Terre en une seconde !

Cette valeur a pris une importance considérable dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. En effet, il a été montré qu'aucune vitesse réelle ne peut être plus grande que c . La vitesse de la lumière est ainsi devenue une constante fondamentale. Plus tard cette valeur a même été fixée, par convention, à sa valeur mesurée. L'unité de longueur est alors définie par un temps.

Le mètre est la longueur parcourue par la lumière, dans le vide, en une certaine fraction de seconde.

Pourquoi précise-t-on toujours "dans le vide". La raison vient de ce que la lumière a une vitesse moindre dans les corps matériels. Dans l'eau par exemple, la vitesse de la lumière n'est que de 225000 km/s. Le rapport entre la vitesse dans le vide et la vitesse dans un corps donné est ce qu'on appelle l'indice de réfraction de ce corps. Cet indice joue un rôle important en optique.

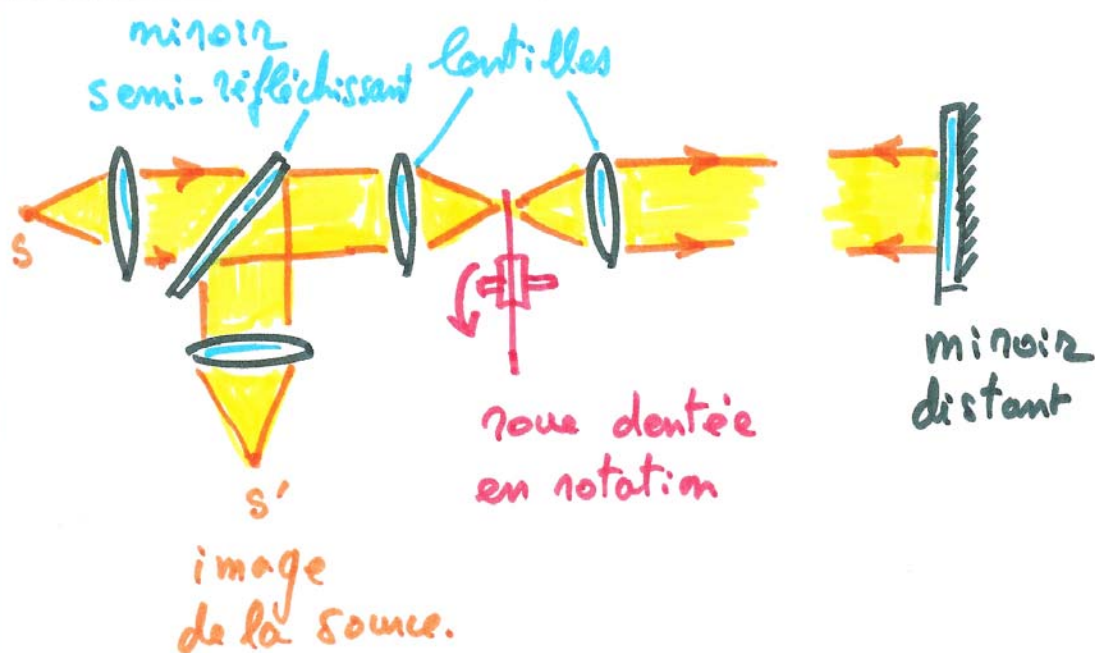
$$\text{Indice de réfraction} = c/v$$

Approfondissement

En 1676, le jeune astronome Römer observait les satellites de Jupiter. Il constata que le début ou la fin des éclipses du satellite Io, c'est-à-dire l'instant où Io entre dans l'ombre de Jupiter ou en sort, se produisait parfois avec de l'avance, parfois avec du retard par rapport aux prédictions. Plus précisément, quand la Terre s'éloignait de Jupiter l'éclipse était en retard ; quand la Terre se rapprochait de Jupiter, l'éclipse se produisait

en avance. Römer comprit que ces écarts provenaient de la variation de la longueur du trajet parcouru par la lumière. Une analyse minutieuse montre que ce phénomène est analogue à l'effet qui sera découvert en 1843 par Doppler (pour le son) et en 1848 par Fizeau (pour la lumière). Nous verrons dans la section *activité*, l'application de l'observation du satellite Io à la détermination de la vitesse de la lumière. La méthode n'est pas très précise car, d'une part, elle suppose connue la valeur de l'unité astronomique et d'autre part, elle doit s'affranchir des nombreuses perturbations qui affectent les satellites de Jupiter pour donner des prédictions précises des éclipses. Quelques années plus tard, l'astronome Bradley découvrit le phénomène de l'*aberration de la lumière*, déplacement apparent d'une étoile résultant de la combinaison du mouvement de l'observateur et de la vitesse de la lumière. Cette observation confirma que la vitesse de la lumière était finie ; une première estimation de la valeur de c fut donnée.

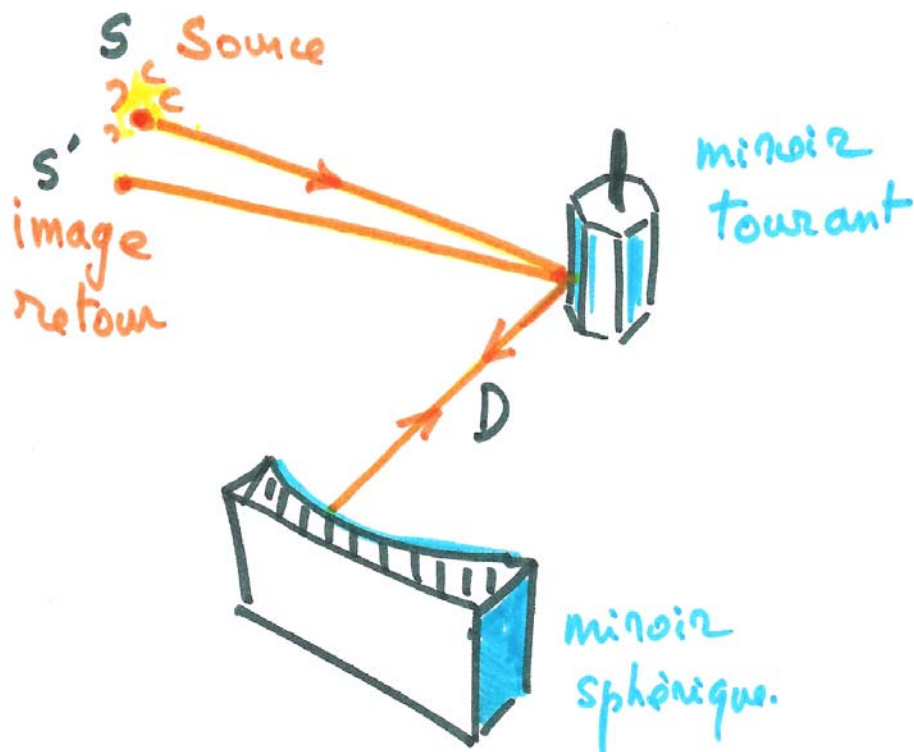
Un progrès immense fut accompli quand la mesure de c a pu s'effectuer sur Terre, en laboratoire. Les premiers succès vinrent de Fizeau avec l'expérience de la roue dentée, faite en 1849, dont le principe est illustré ci-dessous. Essayons d'expliquer le fonctionnement.



Une source lumineuse est focalisée dans le plan d'une roue dentée, juste au niveau des dents. Quand la roue est placée de telle façon que l'image de la source se forme juste entre deux dents consécutives, la lumière passe. L'image est reprise par une lentille et le faisceau ainsi collimaté est envoyé sur un miroir situé à grande distance (plusieurs kilomètres). La lumière réfléchie revient par le même chemin, repasse entre les mêmes dents de la roue. Un miroir semi transparent permet d'observer cette image de retour, sans passer devant le faisceau incident. Imaginons maintenant que nous fassions tourner la roue dentée avec une vitesse de plus en plus grande. Il arrivera un moment où, pendant que la lumière effectue l'aller et retour vers le miroir distant, la roue aura tourné de la largeur d'une dent. L'image de retour ne passera plus. A partir de la vitesse de rotation de la roue, il sera possible d'évaluer le temps mis par la lumière pour faire l'aller et retour. A cette époque, la mesure de la vitesse de rotation se mesurait par stroboscopie sur un diapason, de fréquence fixe et connue.

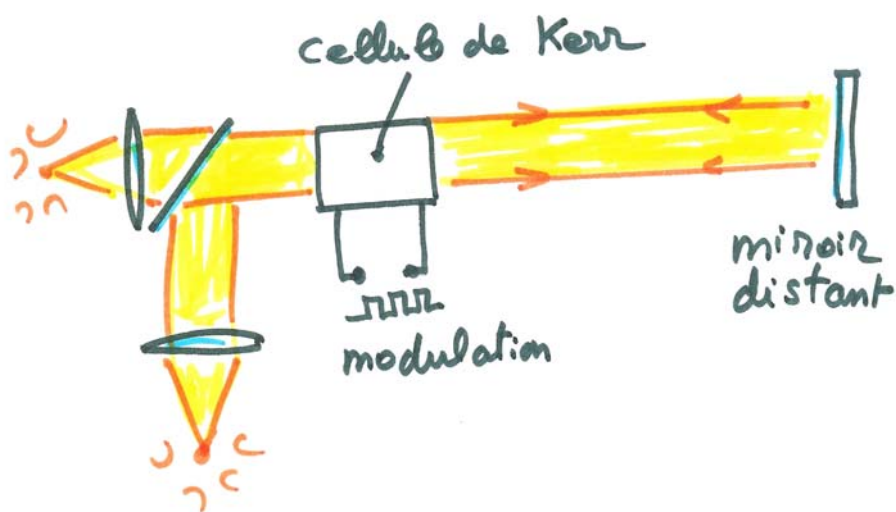
Les valeurs adoptées dans une telle expérience sont par exemple les suivantes : la roue dentée de 5 cm de diamètre, possède 150 dents et le miroir distant est situé à 23 km. La roue doit tourner à 1300 tours par minute.

Une autre expérience mémorable, faite en 1850, est celle du miroir tournant de Foucault présentée ci-dessous. Essayons également d'expliquer le fonctionnement.

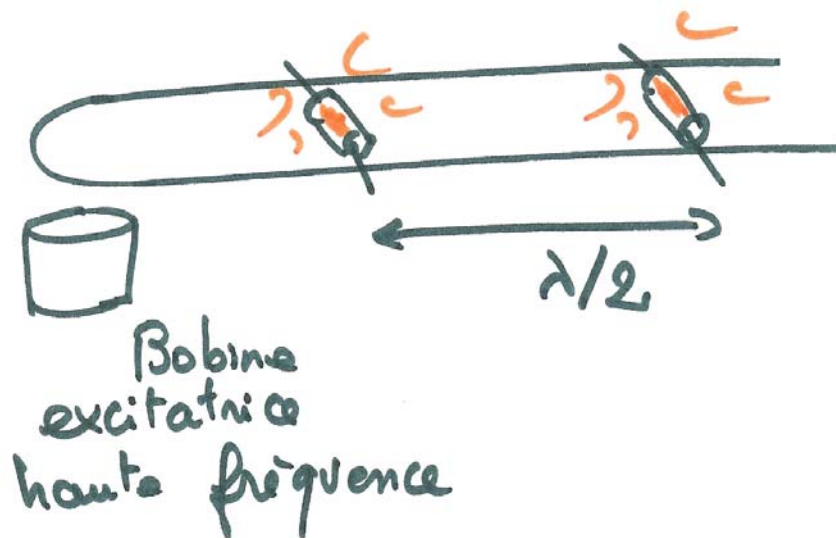


Le point essentiel est que le miroir tournant (parfois à facettes), se trouve au centre d'un miroir sphérique. Un rayon lumineux arrivant sur le miroir sphérique sous n'importe quel angle repartira exactement dans le sens inverse. Quand le miroir à facettes est orienté progressivement dans différentes directions, le rayon lumineux balaye le miroir sphérique, mais revient exactement par le même chemin pour former l'image de la source sur la source elle-même. Dans la pratique et comme précédemment, un miroir semi réfléchissant permet de voir l'image de retour. Si nous faisons tourner le miroir à grande vitesse, le rayon lumineux de retour se réfléchira sur la facette d'entrée mais celle-ci aura légèrement tournée si le trajet parcouru ($2D$) est assez long et la vitesse de rotation assez grande. L'image de la source se formera en un point nouveau S' . Du décalage SS' , de la distance D et de la vitesse de rotation, il sera possible de déduire la vitesse de la lumière. Foucault utilisa une turbine à gaz pour actionner le miroir tournant. La vitesse de rotation était de 48000 tours par minute. La distance D était de 20 mètres seulement.

Ces deux expériences donnèrent les premiers résultats précis de la mesure de c .



Quelles sont les méthodes plus récentes qui ont été employées ? Une première méthode fut de remplacer la roue dentée de Fizeau par une cellule de Kerr, système optique qui permet d'interrompre ou de laisser passer un faisceau lumineux par une simple commande électrique. Ce système est basé sur la polarisation qu'engendre un champ électrique au sein de certains corps, comme le sulfure de carbone ou le nitrobenzène. Le faisceau peut passer ou non, à travers un polariseur selon que le champ électrique est appliqué ou non. L'établissement du phénomène est si rapide (un millième de milliardième de seconde) que l'expérience peut se réaliser sur une longueur très courte.



Une autre technique est celle qui est semblable à l'expérience dite des fils de Lecher, mais qui utilise un guide d'onde à la place des fils. Expliquons tout d'abord l'expérience de Lecher. Si deux fils, tendus parallèlement, sont le siège d'une onde stationnaire de haute fréquence ν , induite par un émetteur proche, il est possible de mesurer l'espace entre les maxima de tension de l'onde stationnaire avec une simple ampoule au néon. L'espace entre les deux points d'éclairement mesure une demi-longueur d'onde. On en déduit la longueur d'onde λ correspondant à la fréquence ν et donc la vitesse de la lumière dans l'air $c = \lambda \nu$. Avec un guide d'onde on procède de manière similaire, mais l'expérience est faite dans le vide.

Activité :

Détermination de la vitesse de la lumière par la méthode historique de Römer

Cette activité est présentée sous la forme d'un exercice. La première partie utilise le passage de Io dans l'ombre de Jupiter. Elle est très simple et sera faisable rapidement. En revanche, la deuxième partie (utilisation des passages de Io devant Jupiter), les calculs sont trop complexes et trop nombreux pour être effectués au cours d'une simple séance d'exercice. Aussi, seront-ils donnés, après que le mode opératoire ait été expliqué. Sur le graphique final ainsi préparé, il sera possible d'effectuer des mesures qui conduiront à la mesure de c par la méthode de Römer.

L'intérêt de présenter les deux méthodes est d'alerter les utilisateurs sur les difficultés qui apparaissent quand on utilise un autre phénomène que le passage de Io dans l'ombre de Jupiter.

Explication de la méthode de Römer en utilisant les éclipses de Io

Le satellite Io passe régulièrement devant Jupiter. On l'observe facilement quand il passe devant Jupiter. Io passe aussi régulièrement dans l'ombre de Jupiter. Cette éclipse n'est pas toujours observable. Parfois on ne voit que le début de l'éclipse, parfois on ne voit que la fin, selon la position de la Terre par rapport à la direction de l'ombre. Peu importe, la durée réelle entre deux débuts ou deux fins d'éclipse est la même, du moins si nous supposons que Io tourne régulièrement autour de Jupiter. Cette durée est la période orbitale de Io. Nous la désignerons par P_0 .

Si un événement (début ou fin d'éclipse) se produit à l'instant t_1 , je l'observerais sur Terre à un instant $t_1 + L_1/c$, où L_1 est la distance qui sépare Jupiter de la Terre. L'événement suivant se fera en t_2 et sera observé en $t_2 + L_2/c$. Si la distance Terre Jupiter n'a pas variée, $L_1 = L_2$. Mais ce n'est pas le cas, car La Terre se déplace et Jupiter aussi, dans leur révolution autour du Soleil.

La période vraie de la révolution orbitale de Io est $P_0 = t_2 - t_1$. En négligeant pour l'instant tout autre phénomène parasite, la période observée est $P = t_2 - t_1 + (L_2 - L_1)/c = P_0 + (L_2 - L_1)/c$. Montrons que si nous pouvons mesurer, à deux époques de l'année, les périodes observées (P' et P''), il est possible de déterminer c , si les deux époques d'observation correspondent à celles pour lesquelles la Terre a un déplacement en direction ou à l'opposé de la direction de Jupiter.

Montrons que cette relation s'écrit, comme pour l'effet Doppler-Fizeau : $v/c = (P' - P'')/2P_0$, où v est la vitesse orbitale de la Terre. Les variables P' et L' se rapportent à l'époque où la Terre se dirige vers Jupiter et les variables P'' et L'' à celle où la Terre s'éloigne de Jupiter.

$$P' = P_0 + (L' - L_1)/c$$

$$P'' = P_0 + (L'' - L_1)/c$$

Si v est la vitesse orbitale de la Terre autour du Soleil, $L' - L_1 = v \cdot (t_2 - t_1) = v \cdot P_0$ et $L'' - L_1 = -v \cdot P_0$. Le signe moins de la deuxième équation provient de ce que la Terre se rapproche de Jupiter ($L'' < L_1$). La période observée est plus longue que P_0 quand la Terre s'éloigne de Jupiter et plus courte quand elle s'en approche.

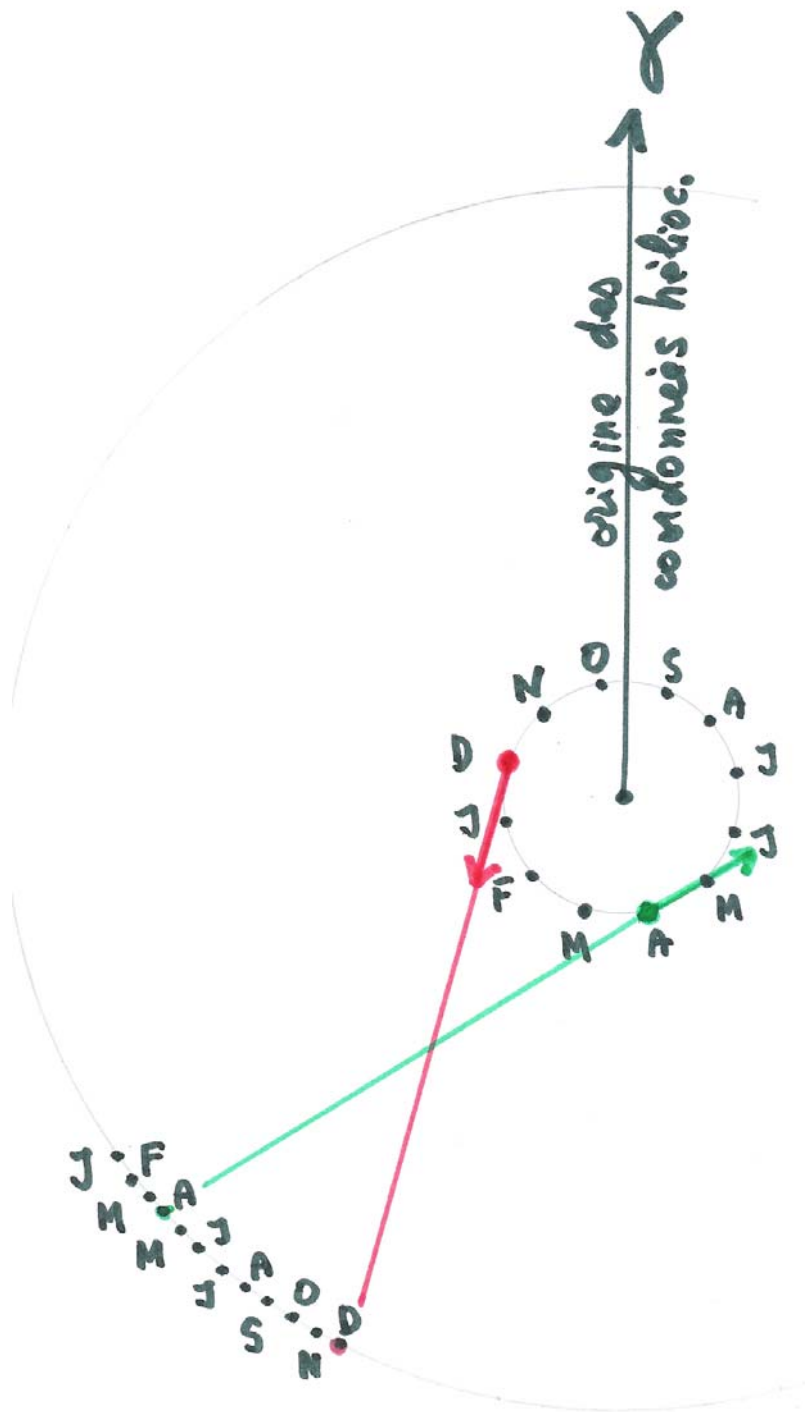
On tire donc $P' - P'' = (L' - L_1)/c - (L'' - L_1)/c = 2vP_0/c$. C'est-à-dire :

$$v/c = (P' - P'')/2P_0 \quad (1).$$

On reconnaît une relation Doppler-Fizeau, pour une vitesse relative $2v$. Le facteur 2 provient de ce que la vitesse orbitale de la Terre v est comptée une fois dans un sens et une fois dans l'autre sens. A l'époque de Römer, la relation Doppler-Fizeau n'était pas connue.

Nous avons pris, au hasard, les observations de l'année 1979, du moins telles qu'elles étaient prédites par le Bureau des Longitudes. Mais auparavant, nous devons trouver les époques où la Terre se déplace vers Jupiter ou à l'opposé de Jupiter.

Nous allons construire les positions relatives Terre Jupiter, à partir des positions héliocentriques de la Terre et de Jupiter (tableau 1 ci-dessous). Quelles seraient les deux dates t' et t'' (approximatives) les plus propices à une mesure précises ?



On trouve sur le graphique que l'époque où la Terre s'éloigne de Jupiter est autour de la fin mars 1979. L'époque où la Terre se dirige vers Jupiter est autour du 1^{er} décembre 1979. Relevons, à partir des éphémérides, les commencements ou les fins d'éclipses autour de ces deux époques.

Eclipses fins (notées E.f.) sur les éphémérides.

12 mars 21h 38,0min

14 mars 16h 06,9min

16 mars 10h 35.7min

On déduit la période en prenant la moyenne des deux déterminations $(1,77007+1.77000)/2=1.77003$

Eclipses commencements (notées E.c.) sur les éphémérides.

1 décembre 12h 13,6min

3 décembre 06h 41,9min

5 décembre 01h 10,1min

On déduit la période en prenant la moyenne des deux déterminations $(1,76965+1.76958)/2=1.76962$

On constate bien que la période observée est plus longue quand la Terre s'éloigne de Jupiter et, réciproquement, plus courte quand la Terre s'approche de Jupiter. Nous adopterons pour période orbitale de Io la moyenne de ces deux déterminations, d'où $P_0= 1.76983$. En prenant pour l'unité astronomique $1 \text{ U.A.}=150 \text{ MKm}$, la vitesse orbitale de la Terre est $v = (2\pi \times 150 \text{ 000000})/(365.25 \times 24 \times 3600) = 30 \text{ km/s}$.

A partir de notre relation 1 nous trouvons la vitesse de la lumière : $c=2vP_0/(P'-P'')$

$$c = 2 \times 30 \times 1,76983 / (1.77003 - 1.76962) = 260 \text{ 000 km/s}$$

Ce qui est une approximation acceptable de la vitesse de la lumière.

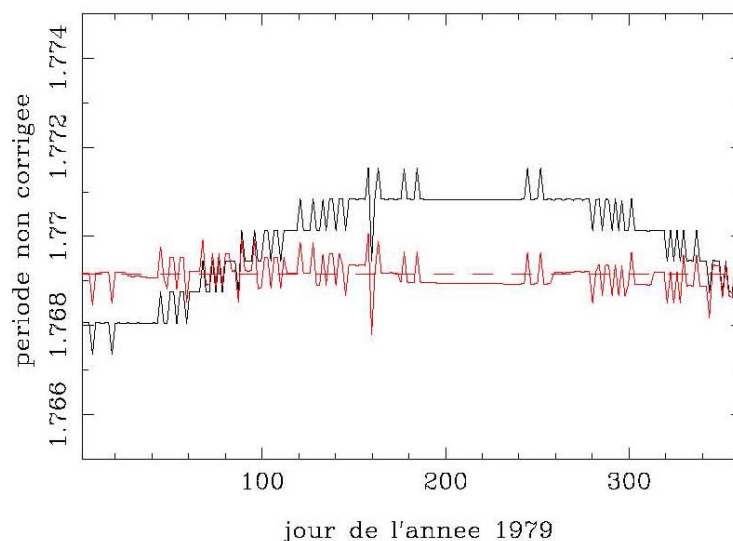
Un terme correctif peut être appliqué. En effet, la direction de l'ombre de Jupiter varie légèrement car Jupiter se déplace un peu. La variation de la longitude héliocentrique de Jupiter, pendant la durée d'une période est de 0.0039 en mars et de 0.0038 en décembre. Les débuts ou fins d'éclipse sont allongés entre les instants 1 et 2, de sorte les périodes t_1-t_2 sont raccourcies des mêmes valeurs. La correction n'est pas négligeable et conduit à $c=342548 \text{ km/s}$.

Nous avons utilisé les éclipses de Io. Peut-on utiliser n'importe quel phénomène périodique (par exemple les temps de début de passage de Io devant Jupiter) pour mesurer la vitesse de la lumière. C'est ce que nous allons étudier.

Utilisation des débuts de passage de Io devant Jupiter

Les passages de Io devant Jupiter peuvent s'observer à chaque cycle. Le nombre de mesures est donc très grand. On peut penser que ce phénomène périodique est plus favorable que l'observation des éclipses. Qu'en est-il exactement ? C'est ce que nous allons étudier.

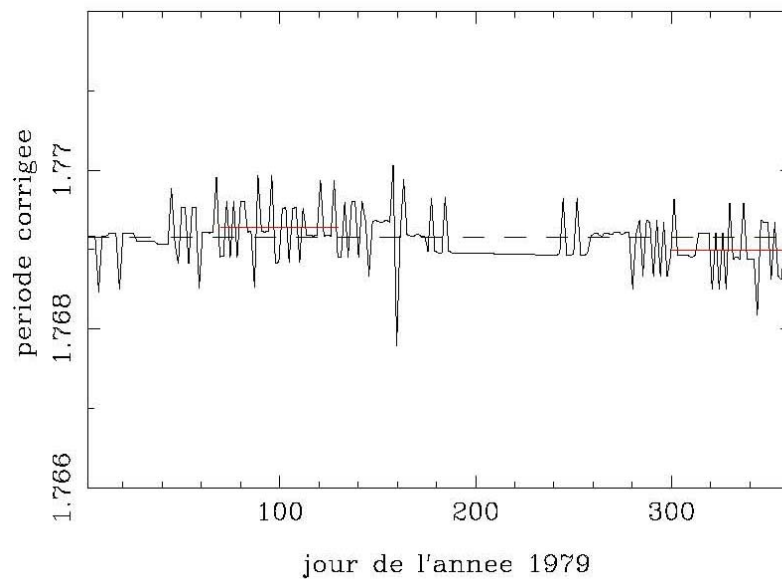
La construction de la variation de P (période des commencements des passages de Io devant Jupiter) en fonction du jour de l'année donne la figure ci-dessous (tracé fait en noir). Les irrégularités sont dues aux erreurs d'arrondi. Nous voyons que la variation globale est bien visible. En prenant pour l'unité astronomique $1 \text{ U.A.}=150 \text{ MKm}$, on peut calculer la vitesse orbitale de la Terre pour les deux époques considérées dans l'exercice précédent. Un calcul similaire permet de déduire la valeur de c.



Le résultat est fort décevant (erreur pouvant atteindre un facteur dix). Quel est l'effet que nous avons négligé qui explique un pareil désaccord ? Il s'agit de l'effet de parallaxe. En effet, contrairement au début d'une éclipse, le temps du début du passage de Io devant Jupiter dépend de la position de la Terre. Or la Terre se déplaçant, l'influence sur la mesure du temps est importante. On peut corriger de cet effet en prenant en compte la variation de longitude géocentrique de Jupiter pendant une période. La correction à appliquer sur la période se calcule ainsi :

$$\Delta P = \Delta l_{géo} \cdot P_o = \Delta l_{géo} (1,77/360)$$

où $\Delta l_{géo}$ est la variation journalière de la longitude géocentrique de Jupiter pour l'époque considérée (mars ou décembre). La correction est calculée pour la durée de la période moyenne P_o . On estime P_o à partir de la courbe non corrigée. Elle est exprimée en jour. En appliquant cette correction on obtient la courbe en rouge qui montre que la variation de la période est bien plus faible.



Nous pouvons calculer P_o , P' et P'' à partir d'un agrandissement de la courbe corrigée et reprendre alors le calcul de c . Les calculs ont été faits avec la totalité des mesures à l'aide d'un programme informatique. On trouve : $P_o = 1.76915 \pm 0.00004$ (la valeur admise est 1.769137). Entre les jours 70 et 130 (mi-mars) $P' = 1.76928$ et entre les jours 300 et 360 (décembre) $P'' = 1.76899$. On obtient alors : $(P' - P'') / 2P_o = 0.00008$ et avec $v = 30 \text{ km/s}$ on trouve $c = 366031 \text{ km/s}$. Le résultat n'est pas meilleur, mais la réalisation est infiniment plus difficile que la méthode utilisant les éclipses de Io.

1979. — COORDONNÉES HÉLIOCENTRIQUES.

JUPITER. —

CENTRE DE GRAVITÉ DU SYSTÈME TERRE-LUNE
Écliptique et équinoxe moyens 1950,0

0 ^h T. U. (s. p. A 68)	LONGITUDE héliocentrique	0 ^h T. U. (s. p. A 68)	LONGITUDE héliocentrique	RAYON vecteur	0 ^h T. U. (s. p. A 68)	LONGITUDE héliocentrique	RAYON vecteur
Janv. 0	121,64259	Janv. 0	98,5463	0,9834	Juill. 7	283,9021	1,0167
8	122,28972	4	102,6233	0,9833	11	287,7157	1,0166
16	122,93618	8	106,7001	0,9833	15	291,5302	1,0165
24	123,58197	12	110,7763	0,9834	19	295,3461	1,0163
Févr. 1	124,22710	16	114,8510	0,9837	23	299,1640	1,0160
9	124,87157	20	118,9236	0,9840	27	302,9844	1,0156
17	125,51539	24	122,9936	0,9844	31	306,8078	1,0151
25	126,15855	28	127,0601	0,9848	4	310,6349	1,0146
Mars 5	126,80106	Févr. 1	131,1227	0,9853	8	314,4662	1,0140
13	127,44293	5	135,1807	0,9859	12	318,3020	1,0134
21	128,08416	9	139,2335	0,9865	16	322,1430	1,0127
29	128,72475	13	143,2806	0,9873	20	325,9896	1,0119
Avril 6	129,36472	17	147,3216	0,9881	24	329,8423	1,0111
14	130,00405	21	151,3559	0,9889	28	333,7014	1,0102
22	130,64276	25	155,3831	0,9898	Sept. 1	337,5675	1,0093
30	131,28086	Mars 1	159,4028	0,9908	5	341,4407	1,0083
Mai 8	131,91834	9	163,4146	0,9917	9	345,3216	1,0073
16	132,55521	5	167,4183	0,9928	13	349,2104	1,0063
24	133,19148	13	171,4136	0,9938	17	353,1073	1,0052
1	133,82715	17	175,4002	0,9949	21	357,0127	1,0041
9	134,46223	21	179,3781	0,9960	25	0,9268	1,0030
17	135,09672	25	183,3469	0,9972	29	4,8496	1,0019
25	135,73062	29	187,3067	0,9983	Oct. 3	8,7813	1,0007
Juill. 3	136,36394	Avril 2	191,2575	0,9995	7	12,7221	0,9995
11	136,99669	6	195,1991	1,0006	11	16,6720	0,9984
19	137,62887	10	199,1317	1,0017	15	20,6309	0,9973
27	138,26048	14	203,0553	1,0029	19	24,5988	0,9962
Avr. 4	138,89154	18	206,9702	1,0040	23	28,5757	0,9951
12	139,52203	22	210,8763	1,0051	27	32,5615	0,9940
20	140,15198	26	214,7740	1,0062	31	36,5558	0,9929
28	140,78138	Mai 30	218,6635	1,0073	Nov. 4	40,5586	0,9918
5	141,41024	4	222,5450	1,0082	8	44,5696	0,9908
13	142,03857	8	226,4189	1,0092	12	48,5884	0,9899
21	142,66637	12	230,2855	1,0101	16	52,6148	0,9890
29	143,29364	16	234,1452	1,0110	20	56,6483	0,9882
Oct. 7	143,92039	20	237,9983	1,0119	24	60,6884	0,9874
15	144,54663	24	241,8454	1,0127	28	64,7349	0,9866
23	145,17236	28	245,6868	1,0134	Dec. 2	68,7870	0,9859
31	145,79799	1	249,5231	1,0140	6	72,8444	0,9853
Nov. 8	146,42231	5	253,3546	1,0146	10	76,9064	0,9848
16	147,04655	9	257,1820	1,0151	14	80,9725	0,9844
24	147,67030	13	261,0058	1,0155	18	85,0420	0,9840
Déc. 2	148,29357	17	264,8264	1,0159	22	89,1143	0,9837
10	148,91636	21	268,6444	1,0163	26	93,1888	0,9835
18	149,53869	25	272,4604	1,0165	30	97,2648	0,9833
26	150,16055	29	276,2750	1,0166	34	101,3416	0,9833
34	150,78195	Janv. 3	280,0887	1,0167	38	105,4186	0,9833
		7	283,9021	1,0167	42	109,4951	0,9834

$$\pi = 102,1687 + 0,0032 (t-1979,0)$$