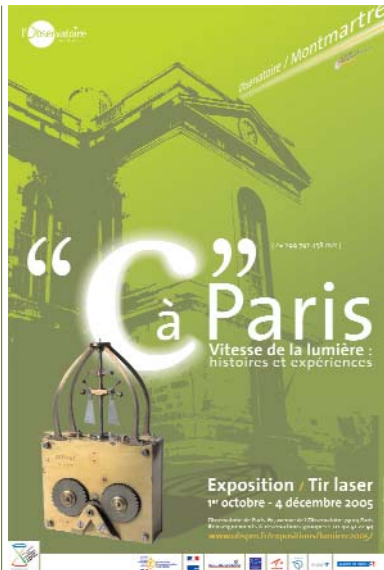


Sommaire



L'Observatoire de Paris - Les mesures de la vitesse de la lumière

- 1. Les déterminations astronomiques de la vitesse de la lumière : 17 ^e - 19 ^e siècles	..... 2
- 2. La roue dentée : la mesure de la vitesse de la lumière par Hippolyte Fizeau	..... 3
- 3. Le miroir tournant : la mesure de la vitesse de la lumière par Léon Foucault	..... 4
- 4. Les mesures de la vitesse de la lumière par Alfred Cornu	..... 5
- 5. Les mesures modernes de la vitesse de la lumière	..... 6
- 6. La vitesse de la lumière et la relativité restreinte	..... 7
- 7. La méthode de Fizeau, version 2005	..... 8
- 8. La vitesse de la lumière et le mètre	..... 9
- 9. La détermination astronomique des longitudes	..... 10
- Glossaire	..... 11
- Les ondes électromagnétiques	..... 11

L'Institut Géographique National - Fiches pratiques

- Le tour de France de l'IGN en 6 étapes	..... 12
- La recette des cartes en relief	..... 12

Les fiches ont été préparées par Jean-Louis Bobin (Université Pierre et Marie Curie), Laurence Bobis (Observatoire de Paris), Suzanne Débarbat (Observatoire de Paris), James Lequeux (Observatoire de Paris) et Giovanni-Daniele Rovera (Observatoire de Paris), avec la contribution de Cécile Barbachoux (Sciences à l'École - LUNAP), de Jean-Yves Daniel (Sciences à l'École - LUNAP) et de l'Institut géographique national.

Mise en page : Service de la communication de l'Observatoire de Paris

Les mesures de vitesse de la lumière



1. Les déterminations astronomiques de la vitesse de la lumière : 17^e - 19^e siècles

◆ Depuis l'antiquité et jusqu'au XVII^e siècle, une sorte de «pensée unique» admettait une propagation instantanée de la lumière. Galilée est l'un des premiers à avoir mis en doute cette opinion. Il est le premier, semble-t-il, à avoir essayé de mesurer la vitesse de la lumière par une expérience nocturne. Il découvrait une lanterne allumée ; un aide, situé à une assez grande distance et muni lui aussi d'une lanterne, la découvrait au moment où il voyait la lanterne de Galilée. Celui-ci estimait le temps écoulé entre le moment où il avait découvert sa lanterne et celui où il voyait celle de l'aide : il lui parut nul. Evidemment la lumière va trop vite pour que l'expérience ait donné un résultat.

◆ Le mérite d'avoir montré que la vitesse de la lumière n'est pas infinie revient à Jean-Dominique Cassini (1625-1712), le responsable de l'Observatoire de Paris, et à Ole (ou Olaus) Rømer (1644-1710), un astronome danois qui travaillait à cet Observatoire. Dès avant son arrivée en France en 1669, Cassini avait établi un programme systématique d'observations des satellites de Jupiter ; il constata que les éclipses par l'ombre de la planète du premier satellite, Io, paraissaient en retard par rapport à ces éphémérides lorsque la Terre était très éloignée de Jupiter, et en avance lorsqu'elle en était proche. Rømer et lui comprirent que ceci était dû au fait que la lumière ne se propageait pas instantanément, et qu'elle mettait donc plus longtemps à nous parvenir de Jupiter lorsqu'il était éloigné que lorsqu'il était proche de nous (Fig. 1). Cette explication capitale date de 1676. Cassini eut plus tard des doutes sur cette hypothèse, car les autres satellites de Jupiter ne paraissaient pas s'y conformer (il est vrai que la mise en évidence de l'effet est alors difficile car leur mouvement est très complexe en raison de leurs interactions mutuelles, ce que Cassini ne pouvait pas savoir). Mais elle fut acceptée par Huygens, Newton et d'autres.

◆ Cassini avait estimé à 10 ou 11 minutes le temps mis par la lumière à aller du Soleil à la Terre (en réalité c'est 8 minutes 19 secondes) ; mais ni lui, ni Rømer ne cherchèrent à connaître la valeur numérique de la vitesse de la lumière, encore que Rømer ait affirmé que la lumière était capable

de parcourir le diamètre de la Terre en moins d'une seconde (en fait en 0,042 seconde). Huygens (1629-1695) calcula mieux cette vitesse. Son calcul est reproduit dans son *Traité de la lumière* publié en 1690. Il utilisa la distance, alors mal connue, entre le Soleil et la Terre, qui était estimée à 12 000 fois le diamètre de la Terre (en réalité 11 750 fois), et la divisa par le temps de propagation ci-dessus. Il trouva environ 230 000 kilomètres par seconde (en unités modernes), et affirma que «la vitesse de la lumière est plus de 600 000 fois plus grande que celle du son». Evidemment la précision était médiocre, le résultat étant trop faible de plus de 20%.

◆ La découverte en 1728 de l'aberration par l'anglais James Bradley (1693-1762) devait permettre un nouveau progrès. L'aberration est le fait qu'en raison du mouvement de la Terre autour du Soleil toutes les étoiles effectuent un mouvement annuel apparent, selon une ellipse plus ou moins aplatie selon leur position, dont le demi grand axe est de 20,4 secondes de degré (Fig. 2). Si on l'exprime en radians, la moitié de cette amplitude est le rapport entre la vitesse de la Terre sur son orbite et la vitesse de la lumière. Bradley a ainsi estimé que la lumière allait 10 210 fois plus vite que la Terre, et en conséquence que le temps mis par la lumière pour parcourir le rayon de l'orbite terrestre était $3,16 \cdot 10^7 / (10\,210 \times 2\pi) = 492$ secondes soit 8 minutes 12 secondes ($3,16 \cdot 10^7$ est le nombre de secondes dans une année). C'était bien mieux que Cassini, mais il restait à estimer avec précision la distance Terre-Soleil pour obtenir une bonne valeur de la vitesse de la lumière.

◆ Plus tard, des progrès furent accomplis grâce aux observations des passages de Vénus devant le Soleil qui donnaient une estimation de la distance du Soleil plus précise qu'auparavant. Mettant tout ensemble, Arago annonçait dans son *Astronomie populaire* une vitesse de 308 300 kilomètres par seconde. Ce fut la dernière détermination astronomique de la vitesse de la lumière : elle devait ensuite passer au domaine du laboratoire.

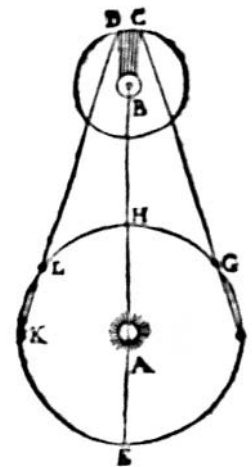


Figure 1. Explication par Rømer des anomalies apparentes du mouvement de Io, le premier satellite de Jupiter. On voit en haut du schéma Jupiter et l'orbite de Io, et en bas le Soleil et l'orbite de la Terre. Entre deux émersions successives d'Io de l'ombre de Jupiter, la Terre s'est déplacée de L à K sur son orbite, si bien que la deuxième émergence paraît en retard de plusieurs minutes puisque la Terre s'est éloignée de Jupiter, ce retard étant le temps mis par la lumière pour parcourir LK.
© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

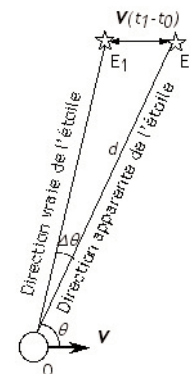


Figure 2. Explication de l'aberration des étoiles. Il est commode de se placer dans le système de la Terre : l'observateur O est fixe et les étoiles ont une vitesse apparente opposée à celle V de la Terre. Au temps t_0 l'étoile est en E et sa lumière parvient en O au temps t_1 . L'intervalle $t_1 - t_0$ est le temps mis par la lumière pour parcourir la distance d de l'étoile à la vitesse c . À l'instant t_1 , l'étoile s'est déplacée à la position E_1 telle que $EE_1 = V(t_1 - t_0)$. La direction vraie de l'étoile est donc OE, tandis que sa direction apparente est OE_1 . L'angle entre ces deux directions est $\Delta\theta = (V/c) \sin\theta$, et ne dépend pas de la distance de l'étoile. La direction de la vitesse de la Terre change au cours de l'année, si bien que la position apparente E de l'étoile décrit en un an une ellipse autour de E_1 , de demi grand axe V/c . L'angle $\Delta\theta$ est ici très exagéré.

Les mesures de vitesse de la lumière



2. La roue dentée : la mesure de la vitesse de la lumière par Hippolyte Fizeau

◆ En juillet 1849, Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) fut le premier à mesurer la vitesse de la lumière dans l'air. Il utilisa une technique d'occultations. La lumière d'un faisceau parallèle effectuait un aller et retour entre une station d'émission-réception implantée dans la maison de campagne de Fizeau située à Suresnes (c'en est devenu la mairie) et un miroir de renvoi disposé au foyer d'une lunette collimatrice chez un ami à Montmartre (Fig. 1). La distance était de 8 633 m, déterminée par triangulation.

◆ Choissant de faire une mesure sur une base de quelques kilomètres, Fizeau avait besoin de compter des temps de l'ordre de la microseconde. Dans ce but, avec l'aide du célèbre constructeur d'instruments de précision Gustave Froment (1815-1865), il avait mis au point un système de roue dentée en rotation rapide : 720 dents sur une couronne de 12 cm de diamètre, un remarquable travail d'usinage de précision. La roue dentée servait à la fois d'obturateur et d'horloge, le temps de référence (période) étant la durée de passage dans le faisceau d'une dent suivie d'un creux de même largeur angulaire (Fig. 2).

◆ Mise en œuvre avec les moyens de l'époque, la méthode de la roue dentée était assez imprécise : le résultat de Fizeau, 315 300 km/s, était éloigné de la valeur adoptée aujourd'hui (299 792 km/s) ainsi que de celle que l'on pouvait déduire des observations astronomiques (308 300 km/s à l'époque). La plus grande source d'erreur venait de la difficulté de connaître la vitesse de rotation de la roue. Malgré ces imperfections, l'expérience de la roue dentée avait le mérite de montrer que la mesure de la vitesse de la lumière était réalisable à une échelle purement terrestre.

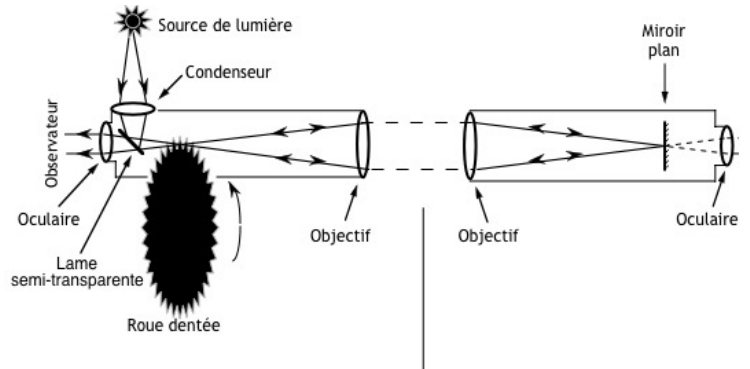


Figure 1. Principe de l'expérience de Fizeau. L'oculaire de la lunette de droite servait à régler la position du miroir plan, qui doit être exactement au foyer.

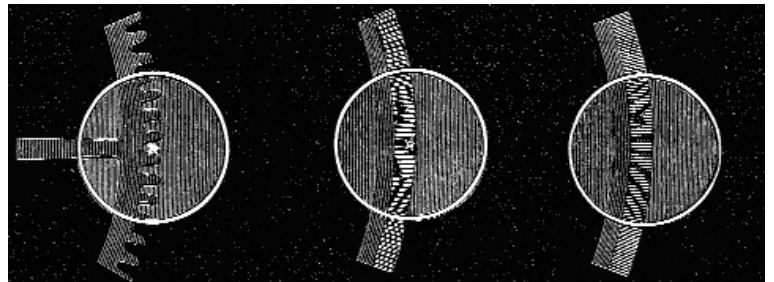


Figure 2. Ce que Fizeau voyait dans l'oculaire. À gauche, roue immobile ou tournant très lentement, le faisceau de retour passe entre deux dents ; au milieu, la roue tourne vite et une dent commence à occulter le faisceau de retour ; à droite, la vitesse est telle que l'occultation est complète.

Les mesures de vitesse de la lumière



3. Le miroir tournant : la mesure de la vitesse de la lumière par Foucault

◆ La lumière se propageant très rapidement, il faut pour mesurer sa vitesse disposer d'un moyen de mettre en évidence des phénomènes extrêmement rapides, dont il est intéressant de faire l'historique. En 1834, lors d'un voyage en Grande Bretagne, François Arago (1786-1853) avait entendu parler d'un appareil construit la même année par le physicien anglais Charles Wheatstone (1802-1875) en vue de mesurer la «vitesse de l'électricité» [c'est-à-dire la vitesse de propagation de l'électricité dans un conducteur]. Wheatstone amenait l'une au dessus de l'autre deux étincelles produites aux deux extrémités d'un long conducteur double, alimenté à l'une de ces extrémités par une machine électrostatique, et les examinait par réflexion sur un miroir tournant très rapidement : si l'étincelle de l'extrémité éloignée avait été en retard sur l'autre, il l'aurait vue décalée angulairement, le miroir ayant un peu tourné dans l'intervalle. Wheatstone ne vit aucun décalage et en déduisit que la propagation de l'électricité était rapide. Sa méthode était astucieuse, et Arago suggéra en 1838 de l'utiliser pour savoir si la lumière se propageait plus vite dans l'air ou dans l'eau. Le but de cette expérience était de choisir entre les deux théories concurrentes sur la nature de la lumière : la théorie corpusculaire de Newton, où elle va plus vite dans l'eau, et la théorie ondulatoire de Fresnel, seule admise aujourd'hui, où c'est l'inverse.

◆ Arago imagina donc de faire une longue étincelle, dont Wheatstone avait montré qu'elle durait très peu de temps (Fig. 1). La lumière issue de la partie basse de l'étincelle passerait dans un tube plein d'eau tandis que celle de la partie haute passerait dans l'air. Les deux rayons arriveraient alors sur un miroir tournant autour d'un axe vertical, et le plus lent d'entre eux, qui arriverait plus tard sur le miroir, serait réfléchi d'un angle plus grand. On aurait regardé ces rayons réfléchis avec une lunette, et on aurait vu lequel aurait mis le plus de temps à parvenir au miroir.

◆ Arago fit construire par Louis Bréguet (1804-1883) un miroir conservé à l'Observatoire de Paris, qui pouvait tourner jusqu'à 2000 ou 3000 tours par seconde ; mais, malade, il ne put réaliser l'expérience.

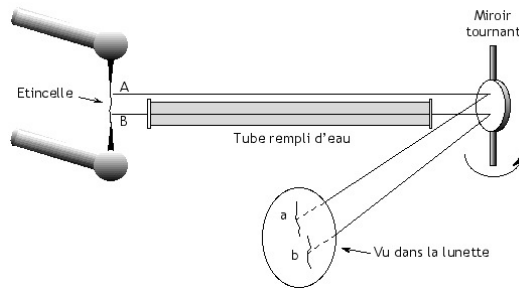


Figure 1. Principe de la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau par Arago.

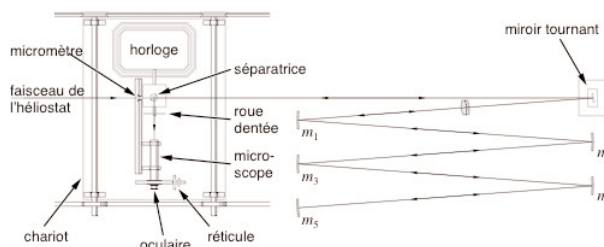


Figure 2. L'appareil de Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière en 1862. La lumière du Soleil renvoyée par un héliostat éclairait un micromètre puis arrivait sur le miroir tournant. Celui-ci l'envoyait via les miroirs m_1 , m_2 , m_3 et m_4 sur le miroir concave m_5 qui la renvoyait sur le miroir tournant par le chemin inverse. Celui-ci, ayant légèrement tourné pendant ce temps, réfléchissait la lumière dans une direction très légèrement différente de la direction d'arrivée. Une lame séparatrice semi-transparente envoyait le faisceau sur le côté, et l'on pouvait observer dans l'oculaire l'image du micromètre, dont on mesurait le déplacement par rapport aux fils d'un réticule. On voyait aussi dans l'oculaire le bord d'une roue comportant 400 dents, entraînée par une horloge à 1 tour par seconde, ce qui permettait de régler par stroboscopie la vitesse de rotation du miroir à 400 tours par seconde exactement.

Elle fut perfectionnée et réussie en 1850 avec ce même miroir par Hippolyte Fizeau. Mais un autre physicien l'avait déjà faite sept semaines auparavant avec un miroir tournant de sa conception, construit par Gustave Froment (1815-1865) : c'était Léon Foucault (1819-1868). Les deux physiciens, qui se brouillèrent à cette occasion, trouvèrent le même résultat : la lumière allait plus vite dans l'air que dans l'eau, ce qui confortait la théorie ondulatoire de Fresnel.

◆ Devenu Physicien de l'Observatoire, Foucault en 1862 reprit, à la demande de son directeur Urbain Le Verrier (1811-1877), la méthode du miroir tournant pour mesurer la vitesse de la lumière de façon absolue. La mesure de Fizeau en 1849 n'avait pas une bonne précision et il fallait faire mieux. Foucault fit construire par Froment un appareil qui est partiellement conservé à l'Observatoire de Paris (Fig. 2), dont des répliques d'époque existent en plusieurs endroits. Le miroir tournant était entraîné par une turbine à air comprimé alimentée par une soufflerie très stable construite par le facteur d'orgues Aristide

Cavaillé-Coll (1811-1899). Sa vitesse - un point critique pour la mesure - était réglée à 400 tours par seconde par un procédé de stroboscopie inventé pour l'occasion. La distance aller-retour parcourue par la lumière était de 40,4 mètres, grâce à un train de cinq miroirs de renvoi. Le déplacement de l'image était mesuré avec précision grâce à un micromètre. En 1862, Foucault obtint la valeur de 298 000 kilomètres par seconde pour la vitesse de la lumière, avec une incertitude estimée, de façon un peu optimiste, à 500 kilomètres par seconde (la valeur exacte est 299 792 km/s). Combinée avec le temps mis par la lumière pour parcourir la distance de la Terre au Soleil, cette mesure ramenait cette distance à 148,3 millions de kilomètres, peu différente de ce qu'avait prédit Le Verrier à partir de ses calculs de mécanique céleste (la valeur admise actuellement est 149,6 millions de km).

Les mesures de vitesse de la lumière



4. Les mesures de la vitesse de la lumière par Alfred Cornu

◆ Si les astronomes étaient satisfaits du résultat de la mesure par Léon Foucault de la vitesse de la lumière en 1862, certains physiciens avaient des doutes sur la méthode du miroir tournant qu'il avait utilisée. Ce fut le cas d'Alfred Cornu (1841-1902), professeur de physique à l'École polytechnique, qui avait été l'élève de Hippolyte Fizeau ; ce dernier avait d'ailleurs été en mauvais termes avec Foucault, ce qui influença sans doute Cornu. Vers 1871, Cornu essaya la méthode de Fizeau et celle de Foucault et fut déçu par le miroir tournant.

◆ Cornu décida donc de remesurer la vitesse de la lumière par la méthode de Fizeau, mais sans tenter de maintenir constante la vitesse de rotation de la roue dentée ; au contraire, il l'accélérait ou la décélérait continuellement, et des contacts électriques sur l'axe du moteur d'entraînement servaient à inscrire automatiquement des signaux à chaque tour sur du papier enroulé sur un cylindre. Cornu inscrivait sur le même cylindre les moments des occultations et des réapparitions de la lumière, et pouvait tout à loisir reconstituer ultérieurement la vitesse de rotation de la roue à ces instants. Ses premiers essais eurent lieu entre l'École polytechnique, qui était alors sur la Montagne Sainte Geneviève, et une ancienne tour de télégraphe située à 2,5 km, puis en 1872 entre cette école et le Mont Valérien, à 10 kilomètres de là ; il mesura cette distance lui-même par triangulation. Il obtint alors une valeur de 298 500 kilomètres par seconde pour la vitesse de la lumière, une valeur très proche de celle de Foucault : ses réserves sur la mesure de Foucault se transformèrent alors en admiration.

◆ Encouragé par Le Verrier et par Fizeau, Cornu reprit en 1874 ses mesures, cette fois entre l'Observatoire de Paris et la Tour de Montlhéry, avec de nouveaux appareils construits par Louis Bréguet (1804-1883). Les Fig. 1 et 2 reproduisent des gravures d'époque qui montrent deux aspects de l'expérience. La distance était assez bien connue, mais Cornu jugea bon de la remesurer en utilisant des points géodésiques situés au Panthéon et à Villejuif. Il obtint une valeur de 300 400 kilomètres par seconde pour la vitesse de la lumière, avec une incertitude qu'il estimait à 300 km/s de façon optimiste.

◆ Ce devait être la dernière manifestation de la suprématie française concernant la mesure de la vitesse de la lumière. Cependant, une dernière mise en œuvre de la roue dentée eut lieu en France en 1902 sous la direction d'Henri Perrotin (1845-1904).

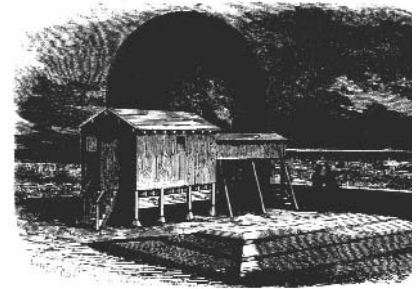


Figure 1. L'expérience de Cornu en 1874 (vue extérieure). La cabane provisoire sur la terrasse de l'Observatoire de Paris abritait la station principale pour la mesure de la vitesse de la lumière. La partie allongée abritait la lunette, dont l'objectif de 38 cm, construit pour la lunette équatoriale située dans la coupole visible à l'arrière, s'était révélé inutilisable pour l'observation astronomique. Le faisceau lumineux (en réalité totalement invisible) aboutissait à la Tour de Montlhéry, où une lunette de 15 cm de diamètre munie d'un miroir renvoyait le faisceau vers l'Observatoire.
© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

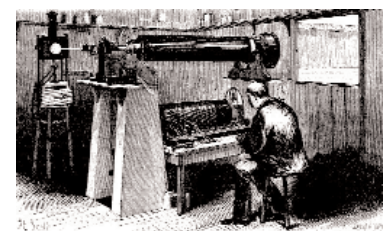


Figure 2. L'expérience de Cornu en 1874 (vue intérieure). La source de lumière était un morceau de craie chauffée à blanc par un chalumeau. La roue dentée et son moteur d'entraînement, de même que le moteur d'entraînement du cylindre avec son petit régulateur, subsistent à l'Observatoire de Paris.
© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Les mesures de vitesse de la lumière



5. Les mesures modernes de la vitesse de la lumière

◆ Après Fizeau et Cornu, on continua à perfectionner leur technique de mesure de la vitesse de la lumière. La dernière mise en œuvre de la roue dentée eut lieu en 1902 sous la direction d'Henri Perrotin (1845-1904), directeur de l'Observatoire de Nice. La base mesurait une quinzaine de kilomètres entre cet observatoire et La Gaude. La valeur trouvée était de $299\,880 \pm 84$ km/s dans le vide (rappelons que la valeur conventionnelle actuelle est de $299\,792,458$ km/s).

◆ La méthode des occultations eut une seconde vie grâce à l'invention des obturateurs ultra-rapides à effet Kerr (biréfringence du nitrobenzène sous l'action d'un champ électrique), puis d'autres types d'obturateurs commandés par l'électronique. De nouvelles réalisations de l'expérience de Fizeau, semblables dans leur principe à celles présentées à l'exposition « c » à Paris, ont ainsi été menées à bien de 1925 à 1950. La dernière, due au Suédois E. Bergstrand, annonçait $299\,796,1 \pm 0,3$ km/s.

◆ La technique du miroir tournant était elle aussi promise à une longue carrière, mais de l'autre côté de l'Atlantique. Ensemble ou séparément, Simon Newcomb (1835-1909) et Albert A. Michelson (1852-1931) refirent l'expérience de Foucault sur des distances allant jusqu'à plusieurs kilomètres, ce qui était leur façon d'améliorer la précision. Après une longue interruption consacrée à d'autres travaux, Michelson effectua en 1924-1926 de nouvelles mesures de vitesse (Fig. 1). Entre le mont Wilson et le mont San Antonio en Californie, distants de 35 km, il obtint $299\,796 \pm 4$ km/s (dans le vide), ce qui fut pendant quelques dizaines d'années la référence quasi officielle.

◆ D'autres méthodes sont indirectes. Nous sommes aujourd'hui convaincus qu'il y a une relation étroite entre la lumière et l'électromagnétisme. Mais cette relation parut au début fortuite : elle reposait sur la coïncidence entre c et le rapport entre les valeurs numériques d'une charge électrique en unités électrostatiques et en unités électromagnétiques. La mesure de ce rapport en 1856 par Kohlrausch et Weber avait fourni $310\,800$ km/s. Des confirmations plus précises furent apportées par de nombreux

chercheurs jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Les Français Alfred Perot et Charles Fabry (1867-1945) sont crédités de la meilleure évaluation avec un rapport égal à $299\,784 \pm 30$ km/s obtenu en 1898. Mais au grand étonnement du physicien d'aujourd'hui qui sait que la théorie électromagnétique de Maxwell est basée sur l'égalité de ce rapport et de c , ce résultat fut présenté par les auteurs sans aucun commentaire.

◆ La fréquence d'une onde électromagnétique étant supposée connue, on peut aussi mesurer la longueur d'onde correspondante dans le vide, le produit des deux quantités donnant la vitesse de la lumière. Diverses expériences spécifiquement dédiées à la détermination de vitesse de la lumière furent effectuées avec succès sur ce principe entre 1890 et 1925. Une des plus intéressantes est celle de l'anglais Louis Essen (1908-1997), qui utilisait une cavité résonante pour fixer la fréquence d'un oscillateur et en mesurait les dimensions (Fig. 2). En 1947 il obtint ainsi $299\,792,5 \pm 1,5$ km/s, valeur qui ne coïncidait ni avec celle de Bergstrand, ni avec celle de Michelson. Cette divergence suscita de nouvelles déterminations, en particulier celle d'un autre chercheur du laboratoire d'Essen, Keith David Fromme, qui confirma la valeur d'Essen en donnant $299\,792,5 \pm 0,1$ km/s. Cette valeur est la meilleure qui ait été annoncée avant l'entrée en scène des lasers en 1959-1960.

◆ Les lasers sont aussi des oscillateurs dont la fréquence et la longueur d'onde sont définies avec une excellente stabilité par une cavité résonante. Plusieurs laboratoires en tirèrent parti pour mesurer la vitesse de la lumière, la précision n'étant cette fois limitée que par l'incertitude sur l'étalon primaire auquel on comparait la longueur d'onde, qui était depuis 1960 une raie du krypton 86. Cette raie, s'étant révélée faite de plusieurs composantes et asymétrique, conduisait à des valeurs de la vitesse de la lumière dans le vide comprises entre $299\,792,456$ et $299\,792,459$ km/s selon que l'on se référait à son centre ou à son pic. Finalement, on proposa en 1975 de fixer c à $299\,792,458$ km/s exactement, puis en 1983 de redéfinir le mètre à partir de cette valeur.

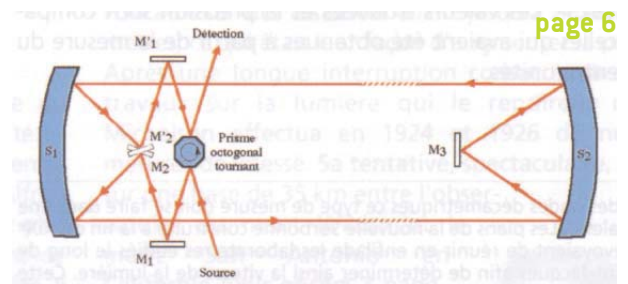


Figure 1. Principe de la méthode de Michelson pour mesurer la vitesse de la lumière. L'élément essentiel était un prisme tournant dont les 8 faces étaient autant de miroirs. La lumière de la source se réfléchissait sur une des faces, puis sur les miroirs M_1 , M_2 et le miroir sphérique S_1 , qui la transmettait au miroir sphérique S_2 à environ 35 km. Elle retournait par M_3 , S_2 puis S_1 , M_2 , M_1 sur le prisme octogonal qui la renvoyait sur le détecteur (M_2 était un peu au dessus du plan de la figure, M_2' en dessous). Si la rotation du miroir octogonal était exactement d'un huitième de tour pendant le temps de transit de la lumière, l'image sur le détecteur était parfaitement symétrique de la source, donc immobile. Le dispositif combinait donc miroir tournant et stroboscopie.

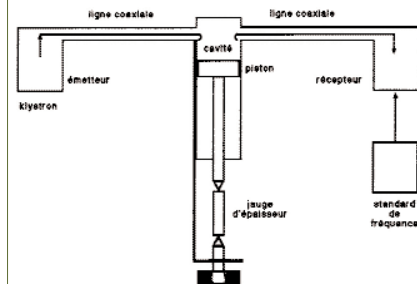


Figure 2. La cavité résonante d'Essen en ondes centimétriques. Un klystron (tube générateur) de fréquence variable entre 5 et 10 GHz alimentait une cavité de longueur donnée. La résonance de l'onde radio le long de l'axe de la cavité cylindrique était détectée par un récepteur, et sa fréquence était déterminée par comparaison avec un standard de fréquence. La position du piston qui fixait la longueur de la cavité, donc la longueur d'onde radio, était connue avec précision grâce à l'interposition d'une jauge d'épaisseur dont la longueur était contrôlée après chaque expérience.

Les mesures de vitesse de la lumière



6. La vitesse de la lumière et la relativité restreinte

◆ On s'est depuis longtemps posé la question de la constance de la vitesse de la lumière. Pour les tenants de la théorie corpusculaire de la lumière de Newton, pour lequel la lumière était faite de corpuscules ayant une masse, rien ne s'opposait à ce que la vitesse de la lumière soit différente d'une source à l'autre. En particulier l'anglais John Michell (c. 1724-1783) avait imaginé que les corpuscules de lumière émis par une étoile pourraient être ralentis par l'attraction gravitationnelle de cette étoile : la vitesse de la lumière pourrait donc être plus ou moins grande selon la masse et le rayon de l'étoile. Par ailleurs, on pensait, assez logiquement dans cette théorie, que la vitesse de la lumière devait se combiner avec celle de la source ou de l'observateur : ainsi on s'attendait à ce que la vitesse de la lumière d'une étoile donnée soit plus grande lorsque la Terre s'en approchait que lorsqu'elle s'en éloignait, et varie donc au cours de l'année. Comment le vérifier ? Toujours dans cette théorie, la lumière aurait été plus ou moins déviée par un prisme selon sa vitesse. François Arago (1786-1853) observa donc en 1806 puis en 1809-1810 la déviation par un prisme de la lumière de différentes étoiles à différentes époques de l'année, sans voir aucun effet. Ceci le conduisit à abandonner la théorie de Newton pour se rallier à la théorie ondulatoire que son ami Augustin Fresnel (1788-1827) était en train de développer. Mais même si l'on pouvait penser que les étoiles émettaient toutes la lumière avec la même vitesse, éliminant ainsi un des problèmes, pourquoi ne voyait-on aucune différence dans la déviation de leur lumière par le prisme au cours de l'année ? Le prisme s'éloignant ou se rapprochant de l'étoile en fonction de la saison, on aurait peut-être dû voir la vitesse varier. Arago demanda à Fresnel de se pencher sur la question, et celui-ci aboutit à une conclusion surprenante : l'éther, le milieu dans lequel la lumière était alors censée se propager, n'aurait été que partiellement entraîné par la Terre (et le prisme) de façon à ce que la déviation par le prisme ne change pas. Au lieu d'être entraîné avec la vitesse u de la Terre sur son orbite, auquel cas cette vitesse se serait simplement ajoutée à celle de la lumière (du moins c'est ce qu'on pensait à l'époque), l'éther n'aurait été entraîné qu'avec la vitesse $u(1-v^2/c^2)$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide et v sa vitesse dans le verre du prisme. Les physiciens trouvèrent en général cela peu convaincant, et ni Fresnel ni Arago eux-mêmes ne paraissent avoir été convaincus.

◆ Les choses en restèrent là jusqu'à ce qu'Hippolyte Fizeau (1819-1896) réalise en 1851, peut-être à l'instigation d'Arago, une

nouvelle expérience sur l'entraînement de la lumière par un corps transparent mobile. Son principe est représenté Fig. 1.

◆ L'expérience donna cette fois un résultat positif : Fizeau observa effectivement le petit déplacement des franges prévu par la formule de Fresnel (l'expérience diffère cependant des observations d'Arago en ce que l'eau se déplace par rapport à l'observateur, tandis que dans les observations d'Arago le prisme était immobile par rapport à celui-ci). Fizeau resta sceptique sur la théorie de Fresnel, écrivant en conclusion de son article :

Le succès de cette expérience me semble devoir entraîner l'adoption de l'hypothèse de Fresnel, ou du moins de la loi qu'il a trouvée pour exprimer le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps ; car bien que cette loi se trouvant véritable [vérifiée], cela soit une preuve très-forte en faveur de l'hypothèse dont elle n'est qu'une conséquence, peut-être la conception de Fresnel paraîtra si extraordinaire, et, sous quelques rapports, difficile à admettre, que l'on exigera d'autres preuves encore, et un examen approfondi de la part des géomètres [théoriciens], avant de l'adopter comme expression de la réalité des choses.

◆ L'expérience de Fizeau a été répétée plusieurs fois avec des résultats concordants, notamment par Albert A. Michelson (1852-1931) et Edward W. Morley (1838-1923) qui ont vérifié l'effet avec une grande précision. Michelson et Morley ont réalisé en 1881, puis refait en 1887, une autre expérience plus célèbre par laquelle ils ont observé qu'« il [était] impossible de détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther ». Cette expérience, puis d'autres utilisant des moyens plus modernes, ont montré, en termes simples, que la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de la vitesse de l'observateur. Il revint à Albert Einstein (1879-1955) d'expliquer tous ces phénomènes par la théorie de la relativité restreinte, en abandonnant à ce propos l'éther, qui paraissait jusque là un support nécessaire pour assurer la propagation de la lumière mais qui avait «empoisonné» toute la physique depuis le XVII^e siècle. Le postulat fondamental de cette théorie est l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. On en déduit que si les vitesses s'additionnent simplement si elles sont faibles devant celle de la lumière (Einstein donnait l'image de la vache marchant dans un train en mouvement), ceci n'est plus vrai si elles sont très grandes. Le postulat explique d'emblée les résultats négatifs d'Arago : la lumière arrivait sur son prisme avec la même vitesse quelles que

soient les circonstances*. Les expériences de Michelson et Morley et de leurs successeurs s'expliquent de la même façon. L'interprétation de l'expérience de Fizeau est plus subtile : en effet la lumière a une vitesse inférieure à c dans l'eau, et sa vitesse peut se composer avec la vitesse de l'eau. Un calcul relativiste montre que si v est la vitesse de la lumière dans l'eau au repos ($v = c/n$ où n est l'indice de réfraction de l'eau), et que si l'eau se déplace elle-même dans la direction de la lumière avec la vitesse u , la vitesse résultante V de la lumière par rapport à un observateur au repos est :

$$V = (v + u) / (1 + uv/c^2)$$

Le lecteur expert en mathématiques pourra vérifier 1) que V est égal à c quel que soit u si $v = c$, conformément au principe de relativité et 2) que la formule donnée par Fresnel et Fizeau, qui suit, est en accord au premier ordre en u/c avec la formule relativiste, u étant beaucoup plus petit que v et c :

$$V = v + u(1 - v^2/c^2),$$

alors que si les vitesses s'étaient simplement additionnées on aurait eu $V = v + u$, ce qui est très différent.

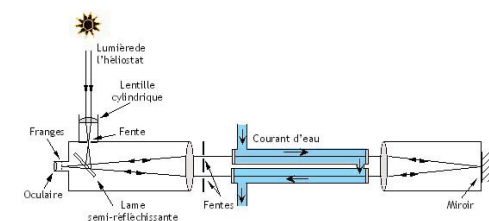


Figure 4.6. L'expérience de Fizeau. La lumière arrivant du Soleil via un héliostat est concentrée sur une fente située au foyer d'une lunette, qui en produit donc un faisceau parallèle devant son objectif ; on place devant l'objectif deux fentes. La lumière issue de chacune de ces fentes parcourt un tube de 1,5 m de long rempli d'eau, puis arrive à une autre lunette munie d'un miroir. Cette lunette renvoie la lumière qui lui parvient d'un des tubes dans l'autre tube, si bien qu'avec le sens indiqué de circulation de l'eau les effets s'ajoutent. Les deux faisceaux lumineux ainsi renvoyés repassent dans les deux fentes, retombent dans la première lunette et interfèrent à son foyer. On observe avec l'oculaire les franges d'interférence ainsi formées.

* En toute rigueur, il faudrait tenir compte du fait que le prisme était dans l'air, et non dans le vide. Mais la différence est imperceptible.

Les mesures de vitesse de la lumière



7. La méthode de Fizeau, version 2005

◆ Pour commémorer, dans le cadre de l'Année Mondiale de la Physique, la première mesure de la vitesse de la lumière effectuée sur Terre en juillet 1849 par Hippolyte Fizeau (1819-1896 ; Fig. 1), un groupe de physiciens et d'astronomes a voulu reconstituer cette expérience avec les moyens du XXI^e siècle. Le principe de la méthode consiste à occulter périodiquement une source de lumière au moyen d'une porte, ouverte puis fermée pendant des temps égaux. A l'ouverture, la lumière est dirigée vers un réflecteur situé à une distance connue. Si au retour le créneau de lumière réfléchi est exactement occulté par la fermeture de la porte, un observateur situé derrière celle-ci ne verra aucun signal. Il convient de régler la période d'occultation pour qu'il en soit ainsi. Un calcul simple fournit alors la vitesse de la lumière.

◆ En 2005 (Fig. 2), la source est un laser continu émettant dans le vert et envoyé vers Montmartre depuis la terrasse de l'Observatoire. Le dispositif d'occultation est un modulateur acousto-optique qui tient lieu de porte. La détection, le calcul et l'affichage se font par des dispositifs électroniques.

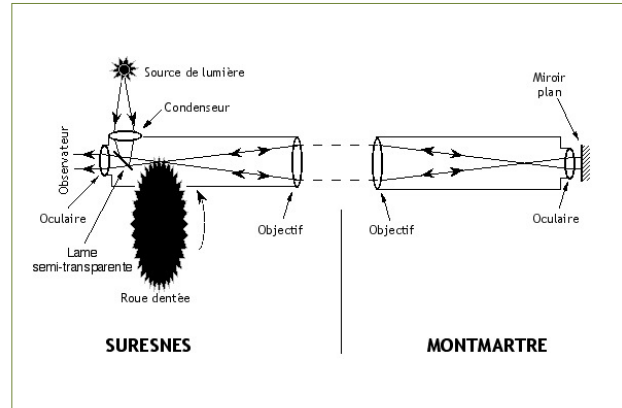


Figure 1 : Principe de l'expérience originale de Fizeau. En 1849, la succession des dents et des creux découpés sur la couronne d'une roue dentée en rotation rapide constituait la porte. La source était un morceau de craie chauffé à blanc par la flamme d'un chalumeau oxydrique (limelight). Le détecteur était l'œil de l'observateur. L'expérience avait été réalisée entre Suresnes et Montmartre.

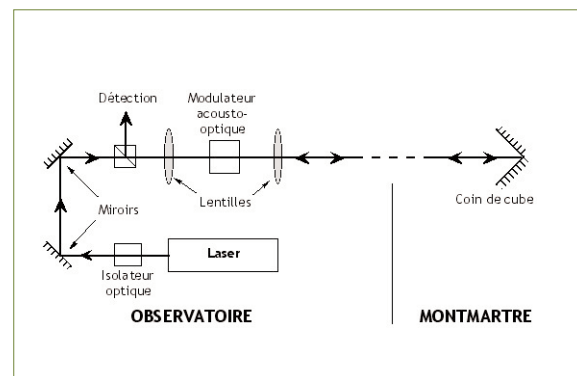


Figure 2 : Principe de l'expérience de 2005.

Les mesures de vitesse de la lumière



8. La vitesse de la lumière et le mètre

◆ Avant 1960, l'unité de longueur était matérialisée par un objet physique, qui fut d'abord le mètre des Archives (Fig. 1), dont la longueur était proche de la millionième partie du méridien terrestre, calculée d'après la mesure du méridien de Paris de Dunkerque à Barcelone faite par Jean-Baptiste Delambre (1749-1822) et Pierre Méchain (1744-1804). Puis ce fut en 1889 un mètre étalon déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres, construit de manière à ce que sa longueur soit aussi proche que possible de celle du précédent. Au vu des difficultés que présentait le repérage précis des traits gravés sur le mètre du pavillon de Breteuil, ce qui ne permettait qu'une précision de l'ordre de 10^{-6} sur la longueur, la définition a été changée en 1960 : la longueur du mètre a alors été basée sur la longueur d'onde dans le vide d'une transition de l'isotope 86 de l'atome de krypton, émise par une lampe spectrale. Cependant, on a observé que le profil de cette raie était légèrement asymétrique, d'où une nouvelle difficulté pour utiliser cet étalon qui n'était précis qu'à 10^{-8} . Il fallait trouver mieux.

◆ Les progrès des techniques rendaient envisageable la mesure simultanée de la fréquence ν et de la longueur d'onde λ dans le vide de la raie spectrale d'un laser dans l'infrarouge. Par définition, ces deux quantités sont liées et leur produit n'est autre que la vitesse de la lumière : $c = \nu \lambda$. La longueur d'onde pouvait être rattachée directement à celle de la raie du krypton définissant le mètre, ce qui permettait d'assurer la continuité avec la définition du mètre alors en vigueur ; la fréquence pouvait de son côté être directement comparée à celle d'un maser* à césium, à partir de laquelle est définie l'unité de temps, la seconde. Ces mesures peuvent être extrêmement précises. Le Laboratoire Primaire du Temps et de Fréquences (LPTF) de l'Observatoire de Paris, qui est aujourd'hui devenu le SYRTE, y a largement contribué. Il devenait donc possible de donner une nouvelle définition du mètre à partir de la seconde et de la vitesse de la lumière dans le vide, dont la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, abondamment vérifiée dans toutes ses conséquences, postule qu'elle est une constante universelle. La Conférence Générale des Poids et des Mesures a donc décidé en octobre 1983 que le mètre ne serait plus une unité fondamentale, mais une unité dérivée de la seconde et de la vitesse de la lumière, à laquelle on donnerait une valeur conventionnelle choisie de façon à assurer la meilleure continuité possible de la longueur du mètre [299 792 458 mètres par seconde exactement]. Dorénavant, selon la nouvelle définition officielle :

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde.

◆ La précision avec laquelle est défini le mètre n'est donc plus limitée que par la précision sur la définition de la seconde, qui dépend de la stabilité des masers à césium, qui est de l'ordre de 10^{-15} et que l'on cherche continuellement à améliorer.

◆ Pour l'expérience du LPTF (Fig. 2) la fréquence d'un laser hélium-néon infrarouge de longueur d'onde 3,39 micromètres, multipliée par un nombre connu grâce à une chaîne de multiplication de fréquences, a été directement comparée à celle du maser à césium à partir de laquelle est définie la seconde.

◆ Aujourd'hui, le laboratoire continue à travailler dans ce domaine en mesurant la fréquence des lasers utilisés pour la mise en pratique de la définition du mètre. Heureusement, depuis le début des années 2000, l'emploi d'une nouvelle technique basée sur un laser femtoseconde a permis de simplifier grandement ces expériences. Désormais la mesure de la fréquence des lasers est presque routinière et le système complet tient sur une table optique de petites dimensions.

◆ Tout ceci peut paraître à première vue d'un intérêt limité. Il faut cependant réaliser que les mesures précises de distance sur la Terre, qu'elles soient faites par des topographes sur de grandes distances ou par des géomètres dans les propriétés privées ou publiques, n'utilisent plus des règles ou des chaînes d'arpenteur, mais des GPS ou des télémètres qui mesurent le temps de propagation d'ondes électromagnétiques : lumière visible ou infrarouge, ou ondes radio. Si le GPS nous permet de savoir où nous sommes au mètre près, nous guide pour nous rendre d'un endroit à un autre, et permet même de mesurer le déplacement relatif des plaques tectoniques ce qui implique une précision centimétrique, c'est aussi en utilisant la vitesse de la lumière. La nouvelle définition du mètre est donc passée dans la vie courante, ce que l'on n'avait sans doute pas envisagé clairement en 1983.

* Maser et Laser reposent sur le même principe mais diffèrent par leur longueur d'onde : M est pour « microonde » donc radio centimétrique ou décimétrique, et L pour lumière, avec extension des rayons X à l'infrarouge lointain.



Figure 1. Le mètre
© Observatoire de Paris



Figure 2. Une partie de la chaîne qui a permis de mesurer jusqu'à très récemment au LPTF des fréquences dans le domaine optique

Les mesures de vitesse de la lumière



9. La détermination astronomique des longitudes

◆ Pour tous les déplacements terrestres ou maritimes, il est nécessaire de disposer de cartes des régions parcourues. Sur la Terre, deux coordonnées sont indispensables pour repérer les lieux : la latitude dans le sens Nord-Sud et la longitude dans le sens Est-Ouest. La latitude a été obtenue dès l'Antiquité par l'observation de l'étoile polaire ou d'autres étoiles, dont la hauteur au-dessus de l'horizon change lorsqu'on se déplace dans le sens nord-sud. En ce qui concerne les longitudes, la rotation de la Terre sur elle-même en 24 heures, autour d'un axe perpendiculaire à l'équateur, ne permet pas - comme c'est le cas pour la latitude - de disposer d'un repère céleste fixe et on ne peut définir que des différences de longitudes (ou des longitudes relatives à un méridien origine). Les longitudes n'étaient obtenues avant la deuxième partie du XVII^e siècle que par des mesures au sol : comptages de pas, plus tard de tours de roue de voitures. Ces méthodes sont peu précises et expliquent l'allongement est-ouest des cartes anciennes. En mer, c'était pire car la seule solution paraissait d'estimer la vitesse du bateau.

◆ La longitude peut s'obtenir d'une façon bien meilleure en observant les étoiles : en effet, la différence entre les temps de passage d'une même étoile au méridien de deux lieux est égale à la différence de leurs longitudes. Mais il faut pour mesurer les instants de passage au méridien synchroniser les horloges des deux lieux, ou transporter une horloge fiable d'un lieu à l'autre.

◆ Dès les premiers siècles de notre ère, on a constaté que les éclipses de Lune (passage dans l'ombre de la Terre) se produisent au même instant pour tous les lieux de la Terre, ce qui permet de synchroniser les horloges en ces différents lieux. Cette remarque sera utilisée notamment lors de l'éclipse de Lune du 28 août 1635, qui fut observée en différents points de la côte méditerranéenne. La mesure des longitudes de ces points entraîna une réduction d'un tiers des dimensions est-ouest de la Méditerranée. Galilée et d'autres comprirent très vite, dès la découverte des quatre satellites de Jupiter, Io, Europe, Ganymède et Callisto en 1609/1610, que les fréquentes éclipses de ces satellites, à leur passage dans le cône d'ombre de la planète, présentaient les mêmes caractéristiques que les éclipses de Lune et pouvaient servir à synchroniser des horloges, ou à corriger la marche d'une

horloge en mer à partir des éphémérides qui prédisent l'instant des éclipses. Des observations de ces éclipses sont alors intensivement effectuées de plusieurs côtés en vue d'une solution du « problème des longitudes ».

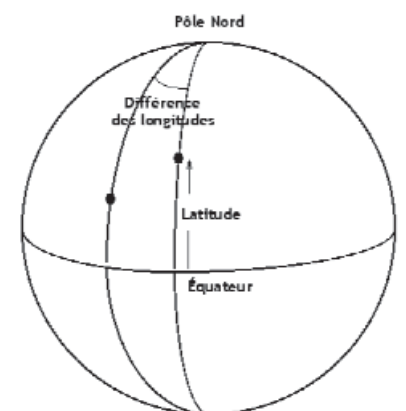
◆ Les observations ainsi accumulées permettront à Jean-Dominique Cassini (1625-1712) d'établir de bonnes éphémérides de ces phénomènes dès 1668. Cette technique nouvelle de détermination des longitudes va aussitôt être mise en œuvre, en 1671-1672, dans une mission à Uraniborg (où se trouvait l'observatoire de Tycho Brahe). Jean Picard (1620-1682) s'y rend. Il y sera aidé par un jeune astronome danois, Ole Rømer (1644-1710); ils observeront du Danemark des éclipses de Io, celui des satellites de Jupiter dont les phénomènes sont les plus fréquents, tandis que Cassini le fera à l'Observatoire de Paris, ce qui permettra de connaître la différence entre les longitudes des deux sites.

◆ Les résultats ayant paru de très bonne qualité, un plan de l'Académie des sciences de 1668, dû principalement à Picard, est approuvé par Colbert et le Roi. Il s'agit, entre autres choses, d'établir une nouvelle carte des côtes de la France et, pour les besoins de la navigation, de déterminer les coordonnées précises des principaux ports. La mission est confiée à Picard et Philippe de La Hire (1640-1718); elle a lieu en 1679-1680. Cette carte, présentée à l'Académie des sciences en 1682, sera publiée en 1693. Selon l'éloge de La Hire, lu à l'Académie des sciences par Fontenelle, elle entraînait « ...une correction très importante à la Côte de Gascogne, en la rendant droite de courbe qu'elle étoit auparavant, et en la faisant rentrer dans les terres, de sorte que le Roy eut sujet de dire en plaisantant que leur voyage ne lui avoit causé que de la perte ».

◆ La méthode, d'une très grande efficacité à terre de sorte qu'elle sera employée pendant près d'un siècle par tous les voyageurs disposant de bonnes horloges à pendule du type Huygens, se révéla inutilisable à la mer en raison des mouvements du bateau qui rendent difficile l'observation des satellites de Jupiter et perturbent ce type d'horloge. La méthode astronomique qui sera alors développée, principalement par les astronomes du Royal Greenwich Observatory, sera fondée sur des propositions françaises de Morin; il s'agit de la méthode des distances lunaires utilisant les déplacements de la Lune relativement aux étoiles de son voisinage. Mais la solution vraiment efficace du « problème des longitudes »

viendra, pour les voyages maritimes, de la construction de montres marines précises par l'Anglais John Harrison (1693-1776), en plusieurs étapes entre 1737 et 1773. Des travaux seront aussi menés en France par d'autres horlogers comme Berthoud, Lepaute, etc., et leurs montres testées à la mer par des astronomes dont les Cassini.

◆ Une importante retombée de la détermination astronomique des longitudes a été la mise en évidence, à l'Observatoire de Paris, du fait que la lumière a une vitesse finie. En effet, Cassini et d'autres astronomes remarquèrent que les éclipses des satellites de Jupiter, émergences/immersions, se produisaient avec un décalage par rapport aux tables fondées sur les observations et les théories antérieures. Le 22 août 1676, Cassini prédit que l'émergence du 16 novembre prochain se produirait avec un retard d'environ dix minutes et proposa à l'Académie deux hypothèses concurrentes pour en rendre compte : soit une variation du diamètre visible de Jupiter soit une variation de la distance à laquelle se trouvait Jupiter par rapport à la Terre, influant sur le temps mis par la lumière à nous parvenir. Dans le *Journal des Sçavans* du lundi 7 décembre 1676, Rømer soutint que la cause du retard constaté était la vitesse finie de la lumière, hypothèse mise en doute plus tard par Cassini qui ne retrouvait pas clairement le phénomène sur les autres satellites, dont les mouvements sont très complexes et les éclipses rares.



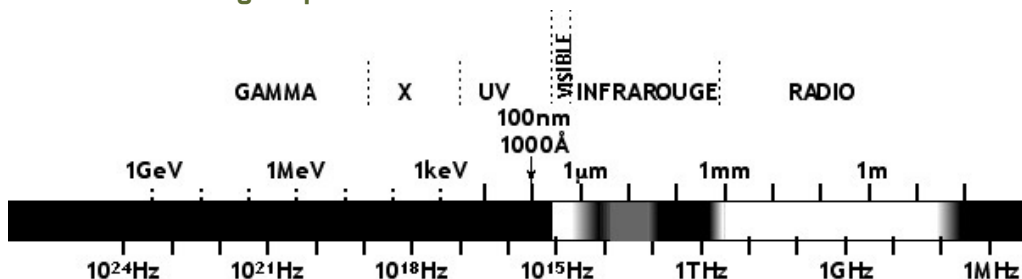
Les mesures de vitesse de la lumière



Glossaire

- ◆ **Biréfringence** : séparation de la lumière en deux composantes polarisées perpendiculairement l'un à l'autre, par certains cristaux comme le spath d'Islande ou certains milieux soumis à un champ électrique.
- ◆ **Ephéméride** : table donnant en fonction du temps la position prévue d'un astre, par exemple la position d'un des satellites de Jupiter par rapport à la planète.
- ◆ **Éther** : milieu hypothétique remplissant tout l'Univers dont les physiciens postulèrent l'existence jusqu'au début du XX^e siècle pour permettre la propagation de la lumière et supporter les champs électriques et magnétiques.
- ◆ **Fréquence** : nombre de vibrations par seconde dans un phénomène périodique comme le son, la lumière visible ou une autre onde électromagnétique. La fréquence s'exprime en hertz (Hz). L'inverse de la fréquence est la période.
- ◆ **Géodésie** : science de la forme et des dimensions de la Terre.
- ◆ **Latitude** : angle donnant la distance d'un point de la Terre à l'équateur, supposée vu du centre de la Terre. La hauteur angulaire du pôle au dessus de l'horizon est égal à la latitude. Les latitudes sont comptées dans l'hémisphère Nord de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord, et dans l'hémisphère Sud de 0° à l'équateur à -90° au pôle Sud.
- ◆ **Longitude** : angle entre un plan méridien passant par le point considéré de la Terre et un plan méridien de référence, choisi par convention internationale comme étant le méridien de Greenwich. Les longitudes sont exprimées soit en degrés, de 0° pour le méridien de Greenwich à 180° soit à l'Est (longitudes Est) soit vers l'Ouest (longitudes Ouest), soit en heures dont chacune correspond à 15°. La différence entre les temps de passage d'une même étoile au méridien de deux lieux est égale (au signe près) à la différence de leurs longitudes, exprimée en heures.
- ◆ **Longueur d'onde** : distance entre deux maxima consécutifs d'amplitude d'une onde. La longueur d'onde λ et la fréquence ν sont liées par la relation $\lambda = c/\nu$, où c est la vitesse de propagation de l'onde (c dans le cas d'une onde électromagnétique comme la lumière dans le vide)
- ◆ **Période** : inverse de la fréquence d'une onde. La période s'exprime en seconde.
- ◆ **Triangulation** : partage d'une surface terrestre en un réseau de triangles contigus, qui comporte une base de longueur et d'orientation connues. La mesure des angles de ces triangles permet de déterminer la longueur d'une ligne géodésique ou de dresser la carte d'une région.

Les ondes électromagnétiques



L'atmosphère est transparente dans le visible et en radio, partiellement transparente dans certains domaines de l'infrarouge, et opaque à toutes les autres longueurs d'onde. L'échelle du haut donne la longueur d'onde, ou l'énergie plus utilisée en rayons X et gamma, celle du bas la fréquence.



LE TOUR DE FRANCE DE L'IGN EN 6 ETAPES

ETAPE 1 : LA GEODESIE

Les Géodésiens de l'IGN ont créé et entretiennent un réseau de milliers de points de repères à la surface de la France, notamment grâce au GPS, et un réseau de 400 000 repères de nivellement à partir du niveau zéro donné par le marégraphe de Marseille.

ETAPE 2 : LA PHOTOGRAPHIE AERIENNE

Depuis cette saison, les 4 avions IGN de la base aérienne de Creil sont tous équipés d'appareils photo numériques de grand format conçus par le service de la recherche. 20 départements sont couverts chaque année par une nouvelle prise de vues (résolution 50 cm) qui permet d'actualiser la base de données ortho photographique (BD Ortho) de la France.

ETAPE 3 : PHOTOGRAMMETRIE

Des dessinateurs tracent une première ébauche de la carte à l'aide de stéréoscopes perfectionnés (numériques & en 3D).

ETAPE 4 : TOPOGRAPHIE

Des géomètres topographes vont compléter sur le terrain et vérifier rapidement cette information « vue du ciel » avant de l'intégrer dans la base de données topographique (BD Topo).

ETAPE 5 : CARTOGRAPHIE

Des dessinateurs cartographes exploitent ces fichiers pour mettre à jour les cartes IGN existantes ou en publier de nouvelles.

ETAPE 6 : IMPRIMERIE

Des imprimeurs reproduisent enfin à des milliers d'exemplaires les fameuses cartes IGN série bleue ou Top 25 utilisées par les randonneurs à pied, à cheval ou à vélo.

LA RECETTE DES CARTES EN RELIEF DE L'IGN

- 1/ Prendre une feuille de plastique, un fond de carte IGN, un bloc de résine, un modèle numérique de terrain (MNT)
- 2/ Imprimer la carte IGN en quadrichromie offset sur la feuille
- 3/ Charger le MNT dans la mémoire d'une fraiseuse numérique
- 4/ Faire sculpter le bloc de résine par la fraiseuse, profil après profil
- 5/ Chauffer la feuille de plastique imprimée d'autant plus que la pente est plus forte
- 6/ Superposer parfaitement la feuille et la maquette en relief du terrain
- 7/ Faire le vide pour plaquer la carte sur la maquette
- 8/ Refroidir puis démouler, c'est prêt !

Pour plus de renseignement et visualiser les cartes en reliefs IGN : www.ign.fr