

## La mesure de la célérité de la lumière et ses péripéties

Nous sommes en 2008, il y a bien longtemps que l'homme se pose la question de "l'instantanéité" du déplacement de la lumière. C'est ce que l'on pensait avant Galilée (1564-1642) et il cherche à estimer sans succès la vitesse de lumière, il conclut qu'elle est très rapide!

Un peu après, Christiaan Huyghens (1629-1695) comprit que les déviations du rayon lumineux dans divers milieux transparents étaient dues à des différences de vitesses, donc vitesse finie! Le milieu où se propageait la lumière devait, à cette époque, avoir des propriétés particulières: c'est "l'éther lumineux" solide et élastique.

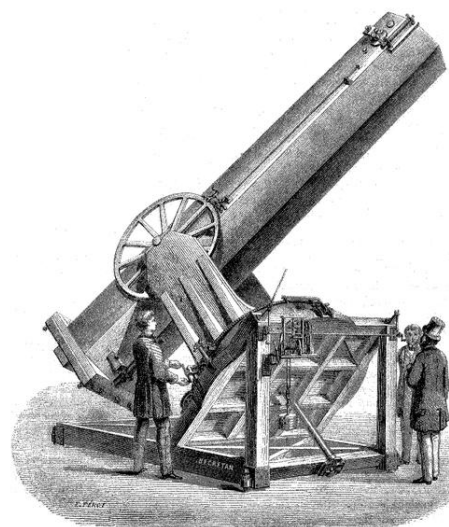
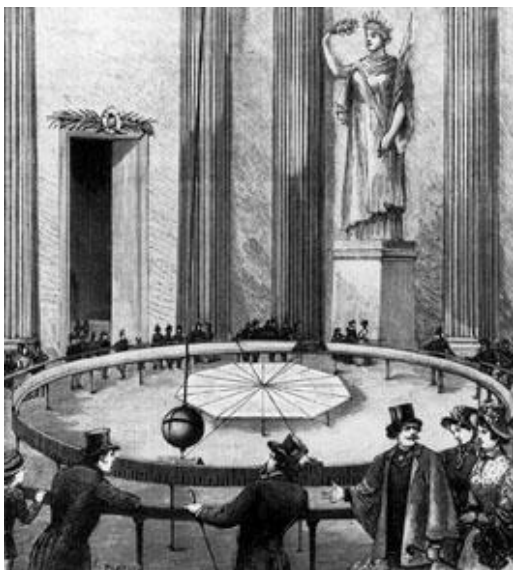
L'astronomie fait de grands progrès après les révélations coperniciennes et aussi grâce à l'utilisation des lois de Kepler (1571-1630) (voir rubrique cours). On prévoit mathématiquement les trajectoires des objets célestes, et la vérification se fait avec succès grâce aux lunettes astronomiques (vers 1610). Jupiter intéresse particulièrement Römer (1644-1710). Il constate une avance ou un retard de quelques minutes des satellites de Jupiter. Selon le cas les apparitions se font au plus proche de la terre ou au plus loin. Il comprend que les décalages horaires sont liés à la distance des satellites, il arrive ainsi avec les données de l'époque à une estimation de la célérité de la lumière de l'ordre de 200 000 km/s, on est en 1676 et c'est la première estimation sérieuse et élégante de la vitesse. Bien entendu les esprits des "lumières" se passionnaient pour ces grandes questions de "philosophie naturelle".

En 1849 Fizeau (1819-1896) réalise une mesure terrestre avec un aller-retour de 16 km.



Le faisceau est alternativement allumé ou éteint par une roue à 720 créneaux (photo ci-dessus). Si le créneau qui obture prend la place de l'ouverture précédente au bout d'un temps  $T$ , et connaissant la longueur du trajet, la vitesse est connue. Fizeau trouve 315 000 km/s.

Peu de temps après Foucault (1819-1868) utilise un miroir tournant à 300 t/s et un miroir cylindrique fixe pour définir un chemin optique de 10 m aller et retour. Pendant cet aller retour de durée  $T$  le miroir a tourné de l'angle  $\alpha$  et le faisceau réfléchi revient dévié d'un angle  $2\alpha$ . Ainsi en 1862 Foucault donne une célérité de 298 000 km/s très proche de la valeur admise actuellement. L'avantage de cette méthode est qu'elle est exploitable en laboratoire et a permis de mesurer la vitesse dans différents milieux transparents et ainsi de la relier à l'indice de réfraction. Cette observation confirma le modèle ondulatoire de la lumière. Rappelons que ce grand physicien et astronome est connu pour une très belle expérience sur la rotation de la Terre mais surtout pour avoir créé un des premiers et le meilleur télescope à miroir du monde en 1864, **toujours visible à l'observatoire de Marseille.**



Le grand télescope Foucault, de l'Observatoire de Marseille.

Au début du 19<sup>ème</sup> quelques grands noms font évoluer les idées concernant l'électrostatique et la magnétostatique, notamment Ørsted, Gauss, Ampère, Faraday, Thomson (Lord Kelvin), et surtout Clerk Maxwell (1831-1879). **C'est ce dernier qui est le grand unificateur et père de l'électromagnétisme.** Après 10 ans de réflexion Maxwell démontre en 1864 l'existence d'un rayonnement dont il établit la vitesse de propagation très près de la valeur actuelle. Peu de temps après, Hertz (1857-1894) confirme expérimentalement l'existence de ce rayonnement aux propriétés identiques à celles de la lumière.

En cette fin du 19<sup>ème</sup> siècle, on pense que la lumière est portée par un milieu dit "éther lumineux" entraîné par la Terre dans son mouvement (analogie avec le son dans l'air). Mais d'élégantes expériences sur Terre et l'observation du ciel contrarient les idées classiques, et il faut bien accepter les faits suivants:

**La célérité de la lumière est indépendante de la vitesse du lieu où on la mesure.** (1881 expérience de MICHELSON puis MORLEY en 1887, toujours plus précisément confirmées depuis !)

**Et l'observation des étoiles doubles confirme que la célérité de la lumière ne dépend pas de la vitesse de la source.**

**La physique découvre donc cette très belle propriété: l'invariance de la vitesse de la lumière.**

Apparaît alors la grande question de l'invariance des lois de la physique décrites dans deux systèmes (inertiels) en translation à vitesse constante. Lorentz (1853-1928) et Poincaré (1854-1912), aidés par les travaux de Minkowski (1864-1909) sur l'espace-temps à quatre dimensions jettent les bases de la physique future. **Dés lors "l'éther luminifère" s'évapore pour toujours!** Einstein (1879-1955) se servant des travaux précédents formalise l'ensemble en 1905 sous le titre de "relativité restreinte".

**L'invariance de la vitesse de la lumière c entraîne deux conclusions:**

Dans deux systèmes  $k$  et  $k'$  de quadri coordonnées  $(x, y, z, t)$  en translation relative à la vitesse  $v$ , on respecte l'invariance de  $c$ , ce qui donne (en simplifiant pour la seule translation selon  $x$ ):

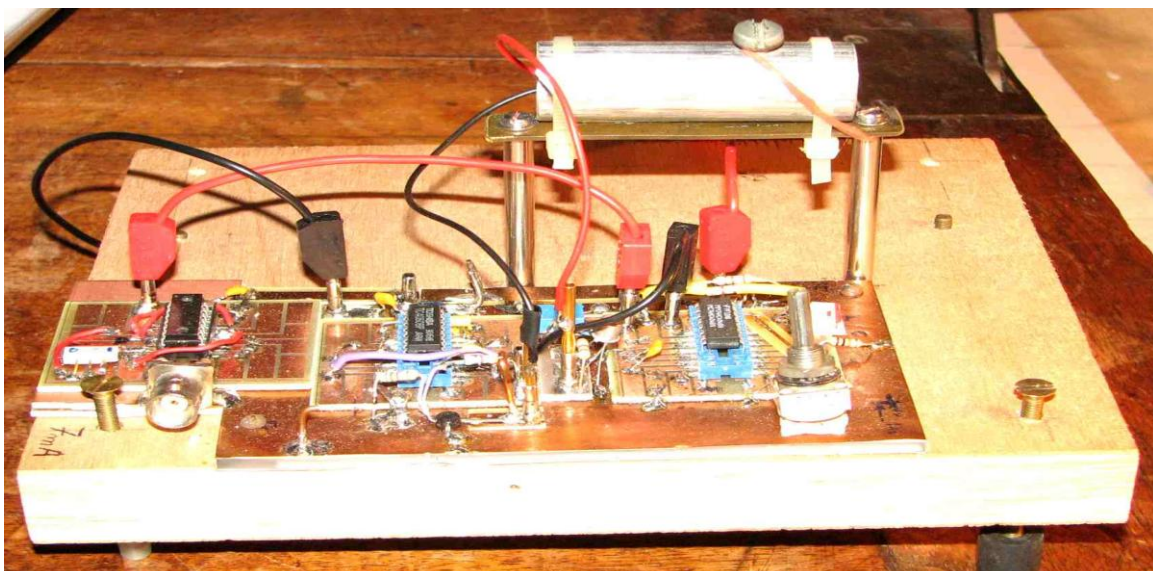
$$X' = \frac{x-v.t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad t' = \frac{t-\frac{v.x}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{La modification du temps } t' \text{ et de la longueur } x' \text{ est affectée par}$$

le même rapport dépendant de la vitesse relative  $v$ . **Ainsi chacun dans son système  $k$  ou  $k'$  voit le temps de l'autre (qui se déplace) raccourci.** Par exemple pour le voyageur à  $v = c/2$  qui passe un an en fusée, nous attendons 13,8 mois (temps propre). **Même raccourcissement pour les longueurs.** Toujours à  $v = c/2$  la fusée mesurant à l'arrêt 10m (longueur propre) est vue par nous à 8,6 m. Simultanément la fusée du voyageur nous paraît raccourcie.

**Revenons enfin dans le vif du sujet: Un pari lancé le premier janvier 2008 très matinalement !!!**

Pour un amateur de sciences et techniques anciennes il est passionnant de réaliser cette mesure qui a tant intrigué, passionné, puis convaincu l'esprit humain. La décision de se lancer derrière Fizeau et Foucault fut prise dans un moment d'euphorie, sous forme de pari devant des amis encore plus euphoriques que moi !

**Première idées:** copier bêtement les illustres prédécesseurs!. Mais une estimation de la vitesse de rotation d'une roue crantée me découragea très vite. Le miroir tournant conduisait aussi à des prouesses inaccessibles à l'outillage d'un bricoleur! Passons donc à des solutions légères grâce à l'optoélectronique rapide: La roue dentée sera remplacée par le découpage du faisceau d'une source lumineuse à réponse ultra rapide (époque de rêve! on trouve des lasers à 5 € avec  $\lambda=650$  nm).

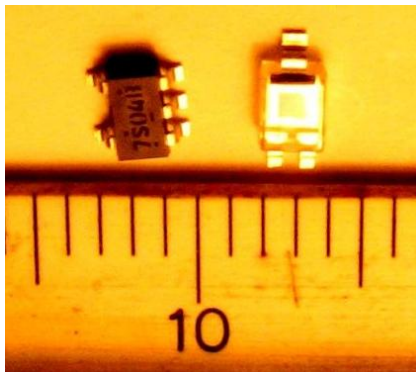




Ci-dessus le laser dans son tube sur pieds monté sur la planche réglable en inclinaison. La planche supporte également l'électronique rapide de commande en impulsion du laser et les 3 piles de 1,5V. L'électronique de commande utilise la technologie HCMOS en 4,5 V.

Pour le récepteur il a fallu tester divers capteurs à semi-conducteurs, le choix s'est porté sur des photodiodes PIN au Silicium ( $\lambda = 850 \text{ nm}$ ) ultra rapides. La polarisation, l'amplification et l'adaptation de la diode PIN est assurée par inverseur très rapide ( $t_m \sim 3 \text{ ns}$ ), le tout alimenté en 3 V.

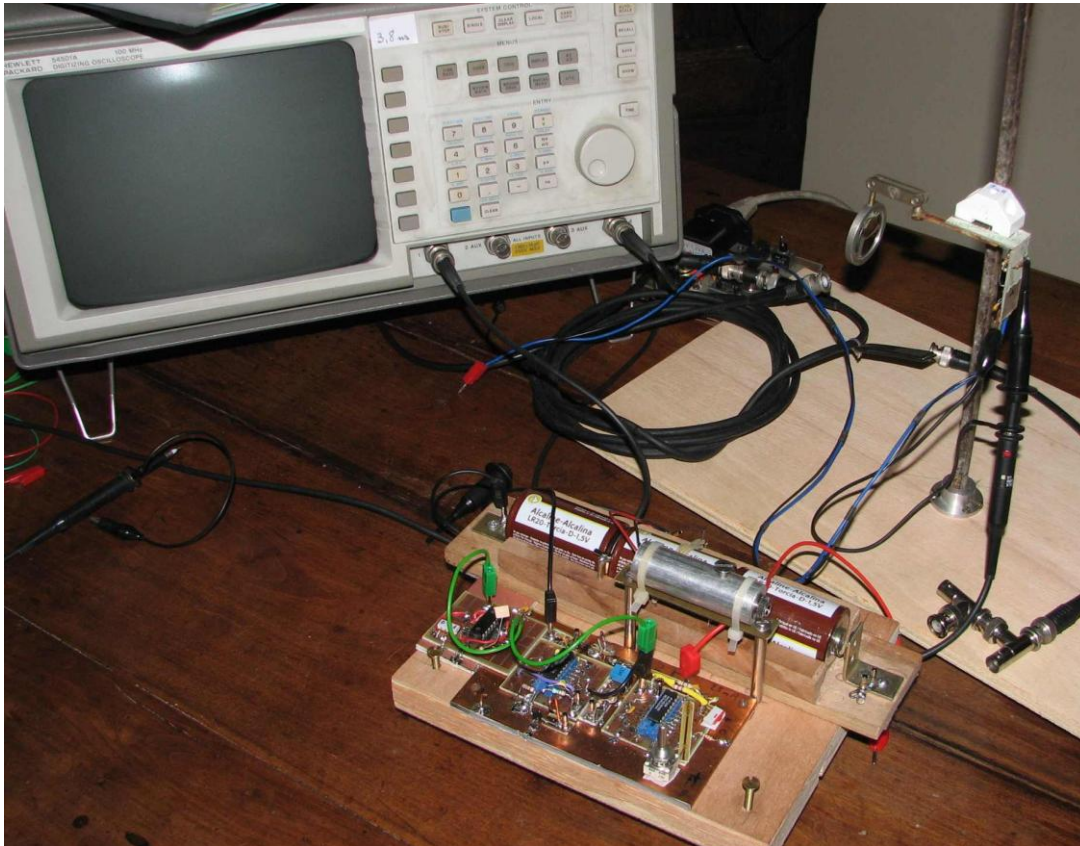
Malgré l'abandon des méthodes mécaniques, il y eu des difficultés "mécaniques" dues à la taille des composants: la diode PIN de l'ordre du  $\text{mm}^2$ , l'adaptateur de l'ordre de  $2 \text{ mm}^2$  en boîtier SOT23.



Une lentille de 70 mm de focale permet de canaliser le faisceau qui a divergé sur le trajet ( $\sim 1 \text{ cm}$ ). L'ensemble capteur et lentille est muni d'un support magnétique collé sur une colonne verticale facilitant le réglage sur le trajet optique.

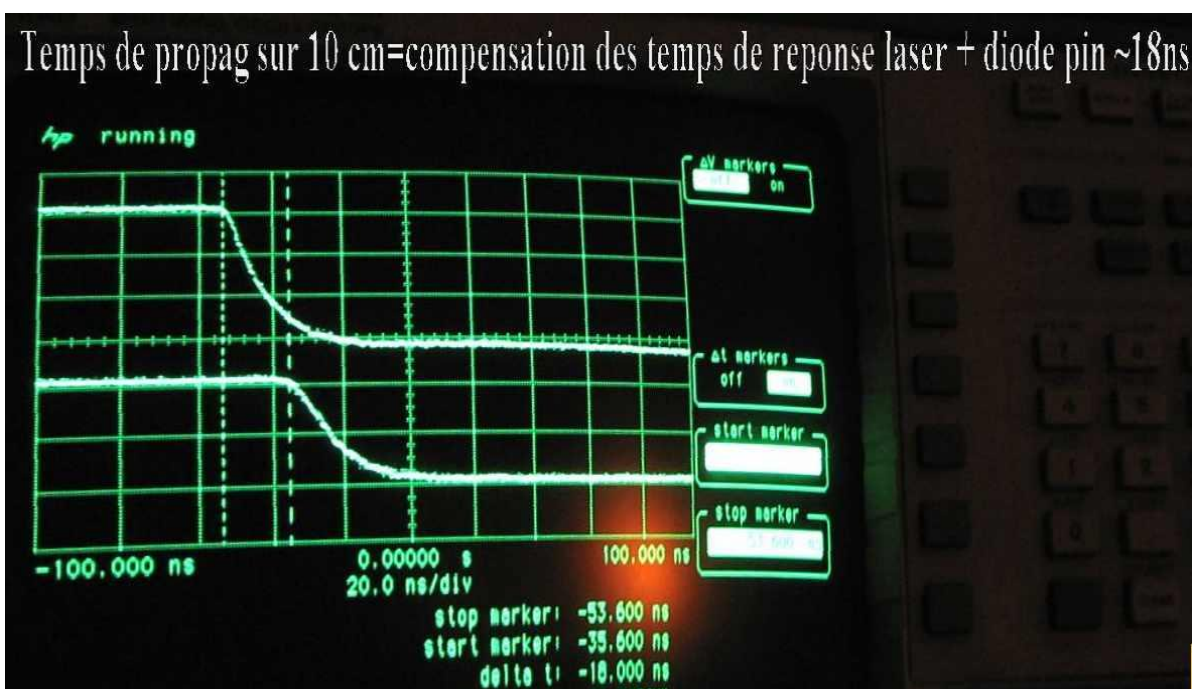


L'installation comprend donc la source, le trajet aller, le miroir, le retour, le capteur, deux sondes (si possible identiques) et un oscilloscope rapide ( $t_m = 2,8 \text{ ns}$ ) à deux voies, donc rien de plus classique.



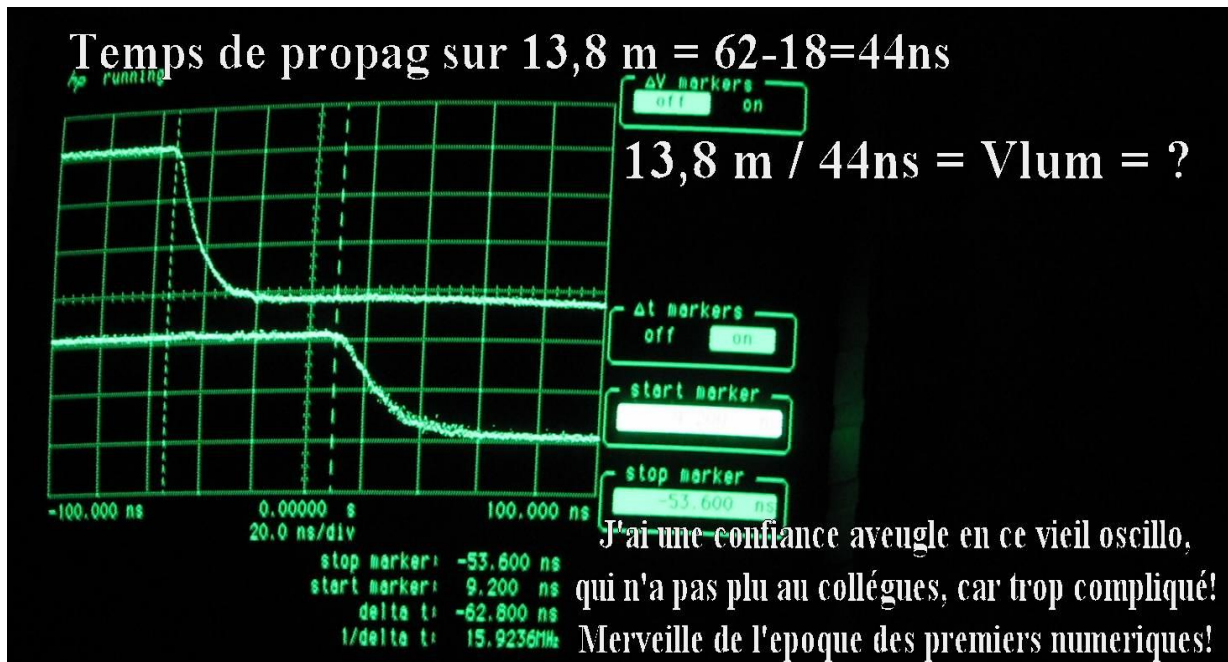
Les premiers essais en salon sur quelques mètres permirent de se faire la main sur l'alignement du faisceau aller retour sur un capteur de surface 1mm<sup>2</sup>, tout le monde comprendra le choix d'une source dans le domaine visible! La mesure de temps de propagation se fait entre l'allumage du laser et la réception de la diode PIN. La mesure impose deux étapes:

**Étape 1:** mesure du temps de réponse de l'ensemble électronique, par conséquent en plaçant le capteur à quelques centimètres du laser, donc avec un parcours optique de longueur quasi nulle.



L'électronique est telle que l'activation du laser est un front descendant, et que l'éclairement du capteur est aussi sur front descendant. On note un temps global de réponse de  $\sim 18$  ns pour l'ensemble de tous les éléments électroniques et optos.

**Étape 2:** mesure du temps avec un parcours d'au moins 10 mètres. L'écran suivant enregistré sur un parcours optique de deux fois 6,7 m, donne un temps de 62 ns auquel on retranche l'ensemble des retards électroniques. Par conséquent la lumière met 44 ns pour parcourir 13,8 m.



**On obtient 313 000 km/s que nous accepterons tel quel sans faire de publication prématurée sur un nouvel effet de dépassement de la célérité de la lumière !**

PS:

Puis des occasions de réaliser en public varié de 7 à 77 ans se présentèrent, cela permis de montrer que l'on peut faire de la pédagogie concrète à peu de frais. J'ai toujours espéré provoquer chez les jeunes têtes la curiosité, puis le regard scientifique vers le monde réel (hors "réseaux sociaux" et écrans portatifs) et pourquoi pas leur donner le goût des sciences exactes en cette époque ou obscurité et charlatans gagnent du terrain sur le web.