



# La lumière dans tous ses états...

Courte histoire commentée de la lumière

## 3. Nature de la lumière - 2

*Charles Hirlimann*

*Directeur de recherche émérite CNRS à l'institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg*

*Membre de l'académie d'Alsace des sciences, des lettres et des arts*

*La Physique pour Tous*

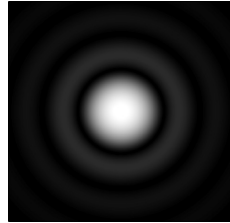


## Sur la nature de la lumière : la diffraction

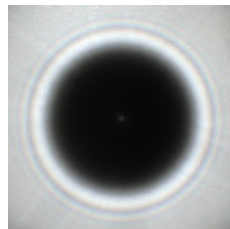
## La diffraction, 1660, 1819



Francesco Maria Grimaldi  
1618-1663



Trou circulaire



Disque



Augustin Fresnel  
1788-1827

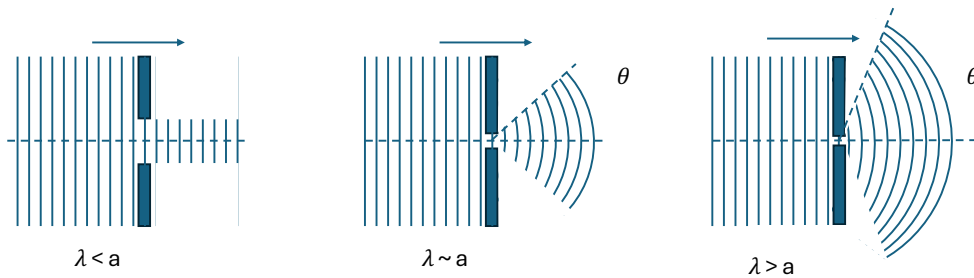
La lumière est  
ondulatoire

La physique pour Tous

3/33

Francesco Maria Grimaldi découvre la diffraction (qu'il nomme) en 1660, son travail est publié post-mortem en 1665. Il suggère que la lumière est un fluide en mouvement rapide. Huygens en fait une interprétation ondulatoire et l'étude du phénomène est entreprise en 1819 par Augustin Fresnel.

### Diffraction par une fente de largeur $a$



La physique pour Tous

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Pour une longueur d'onde donnée, plus  $\lambda$  est grand devant  $a$ , plus  $\theta$  est grand.

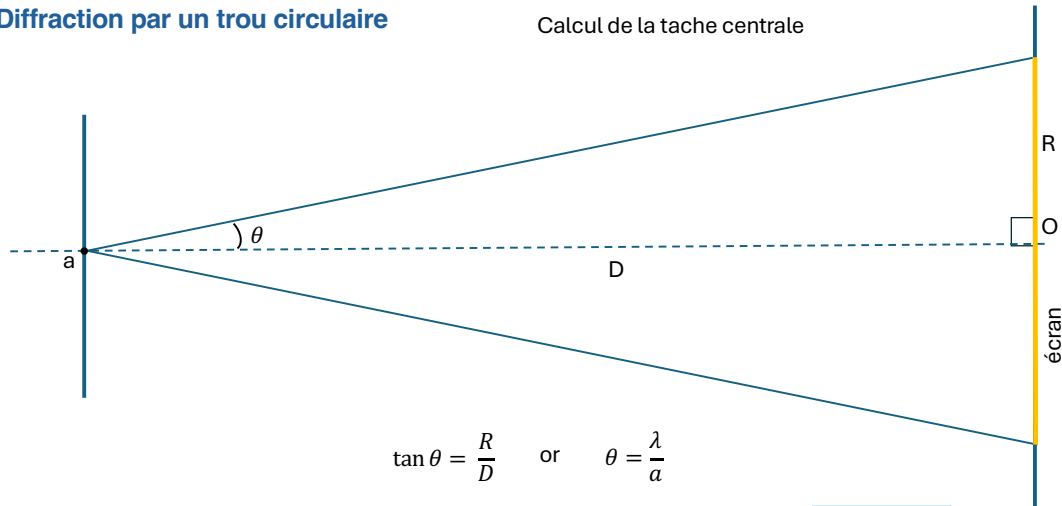
Quelle que soit la situation, longueur d'onde et fréquence de l'onde restent inchangées.

4/33

On considère une onde se propageant vers la droite rencontrant un écran percé d'une fente de largeur  $a$ . Si la longueur d'onde est plus petite que la largeur de la fente,  $a > \lambda$ , l'onde se propage inchangée dans l'espace contraint. Dès que la largeur de la fente est égale ou devient plus petite que la longueur d'onde,  $a \leq \lambda$ , le faisceau d'onde émergeant de la fente diverge en faisant un angle  $\theta$  avec l'axe de propagation de l'onde tel que  $\theta = \frac{\lambda}{a}$ .

## Diffraction par un trou circulaire

Calcul de la tache centrale



$$\tan \theta = \frac{R}{D} \quad \text{or} \quad \theta = \frac{\lambda}{a}$$

$$\tan \theta \approx \theta \approx \frac{R}{D}$$

$$\frac{R}{D} = \frac{\lambda}{a} \quad \text{d'où} \quad R = \lambda \frac{D}{a}$$

Approximation de linéarité

La Physique pour Tous

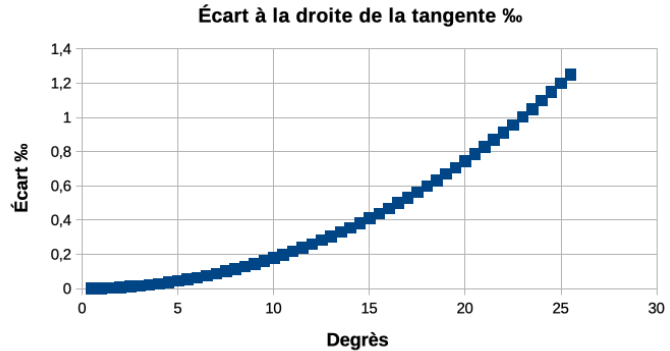
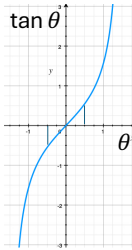
5/33

Calcul de la tache centrale de diffraction de la lumière par un trou circulaire. La tangente de l'angle  $\theta$  est donnée par le rapport côté opposé sur côté adjacent dans le triangle rectangle DRa. La loi de la diffraction dit que l'angle  $\theta$  est égal au rapport de la longueur de l'onde diffractée au diamètre du trou de diffraction  $\frac{\lambda}{a}$ .

Observons la fonction  $\tan \theta$  en fonction de l'angle. On observe que pour des angles proches de 0, la fonction tangente est très proche de la droite  $y = x$ , il est alors légitime d'approximer la tangente d'un angle à l'angle lui-même.

La diffraction, elle aussi donne accès à la détermination de la longueur d'onde de la lumière par des mesures des grandeurs caractéristiques de l'expérience utilisée.

## Approximations en physique



Développement de la fonction sinus en série de Maclaurin

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} - \dots$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots$$

factorielle d'un entier :  $n! = 1 \times 2 \times 3 \dots \times n$

La Physique pour Tous

6/33

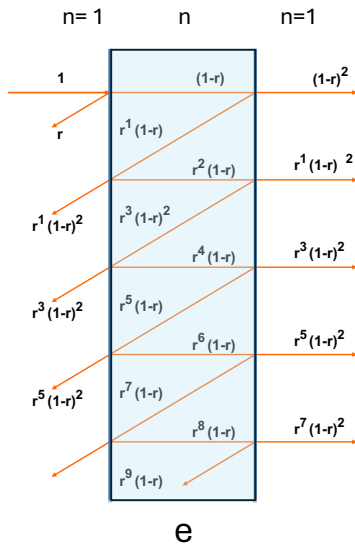
La physique est aussi l'art de faire des approximations pour simplifier les calculs. Observons la fonction  $\tan(\theta)$  au voisinage de  $\theta = 0$ . Nous remarquons que sa forme est très proche de celle d'une droite et que l'on peut donc faire l'approximation  $\tan \theta = \theta$ . La courbe en haut à droite montre l'écart calculé entre la tangente et son approximation et on constate que jusqu'à  $\theta = 20^\circ$  cet écart ne dépasse pas 1‰ !

La ligne du bas donne une forme polynomiale approximative de la fonction sinus montrant sa linéarité à l'ordre le plus bas en la variable. À cet ordre le développement du cosinus montre qu'il vaut 1 et on retrouve bien la linéarité de la tangente en faisant le rapport du sinus au cosinus à l'ordre le plus bas.

Ce qui est dit ici n'est vrai qu'au voisinage de 0, mais il existe des méthodes générales d'approximation polynomiale des fonctions au voisinage de n'importe lequel de leurs points.

## développements de l'optique ondulatoire

### Interférences par une lame mince



La Physique pour Tous



$$A = (1 - r)^2 + r(1 - r)^2 + r^2(1 - r)^2 + \dots + r^i(1 - r)^2 + \dots$$

$i \rightarrow \infty$

8/33

On considère une lame mince d'indice  $n$  dans l'air. Pour la raison de visibilité, les rayons sont tous orthogonaux à la lame mais sont tracés décalés sur la figure. À chaque réflexion des ondes une quantité  $r$  est réfléchi. La transmission de la lumière par la lame résulte de l'interférence de tous les rayons transmis. Les réflexions successives à l'intérieur de la lame décroissent très rapidement.  $0,5^9 = 0,002$ .

Cette figure est tracée en amplitude et  $R = r^2$ .



## Séries géométriques infinies

le nombre de termes croît à l'infini  $a = \text{premier terme}$   
 $i \rightarrow \infty$   $r = \text{raison}$   
 $r < 1$   $i = \text{ordre des termes}$

$$S = a + ar + ar^2 + ar^3 + \dots + ar^i + \dots$$

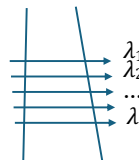
$$rS = ar + ar^2 + ar^3 + \dots + ar^i + \dots$$

$$S - rS = a \Rightarrow S(1 - r) = a \Rightarrow S = \frac{a}{1 - r}$$

La Physique pour Tous

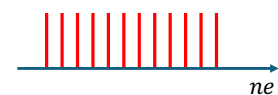
### Cas de la lame mince

$$a = (1 - r)^2 \quad r = r \quad A = \frac{(1 - r)^2}{1 - r} = 1 - r$$



Chaque fois que  $ne = N \frac{\lambda}{2}$

$$I_t \propto A^2 = (1 - r)^2$$

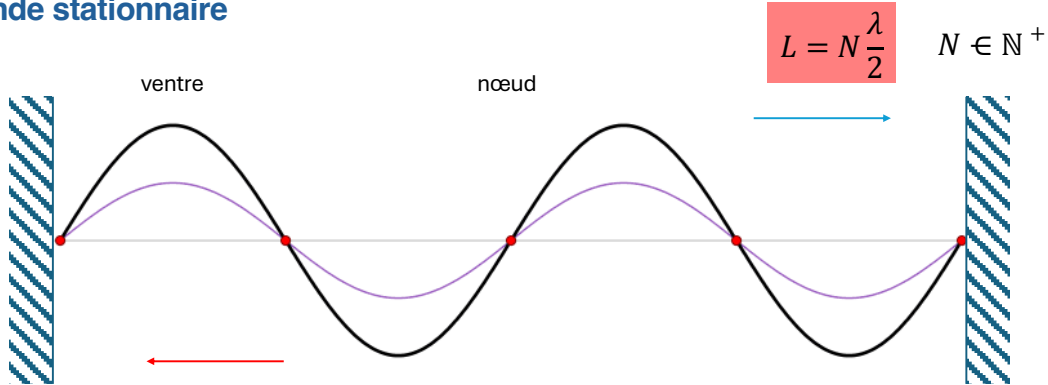


9/33

L'étude des séries géométrique remonte au moins aux Grecs (Euclide ~300 AnE) sous forme géométrique, puis elle fut étudiée en Inde aux V<sup>e</sup>-VII<sup>e</sup> siècle. Le monde islamique en reprit l'étude entre les IX<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles. Sa forme algébrique est apparue à la Renaissance européenne.

Lorsque l'épaisseur optique de la lame admet un nombre entier de demi-longueurs d'onde, toutes les ondes sont en phase et la lame transmet la longueur d'onde correspondante. Sous l'effet de la gravité l'épaisseur de la lame d'eau savonnée de la figure augment du haut vers le bas ce qui entraîne l'observation de raies colorées.

## Onde stationnaire



La Physique pour Tous

- Une onde stationnaire résulte de la superposition de deux ondes de même fréquence et amplitude se propageant en sens inverse dans un milieu clos
- Une onde stationnaire comporte des nœuds • et des ventres

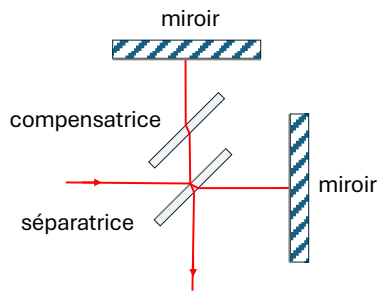
La dimension de l'espace clos contenant une onde stationnaire est un nombre entier de demi-longueurs d'onde

10/33

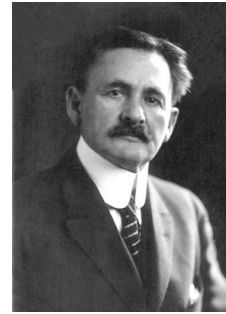
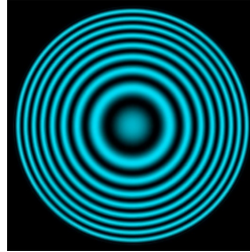
On considère ici la superposition de deux ondes de même fréquence, même longueur d'onde, se propageant en sens inverse. Cette superposition produit une onde stationnaire lorsque les ondes sont contraintes dans un espace limité. Sur la figure 2 longueurs d'ondes sont limitées sur une longueur  $L$ . L'onde stationnaire comporte des points immobiles (points rouges), les nœuds, et des points d'amplitude maximum, les ventres. On retrouve cette problématique dans la physique des instruments à vents.

Une onde stationnaire ne peut s'établir que si l'espace qui la contient peut accommoder un nombre entier de demi-longueurs d'onde.  $L = N \frac{\lambda}{2}$ .

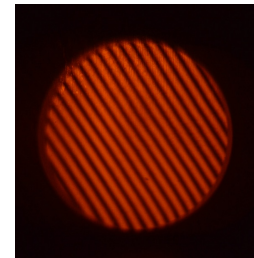
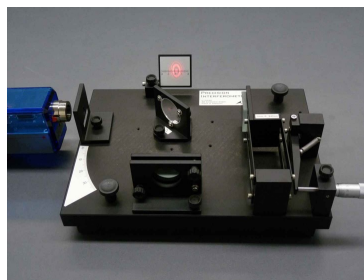
## Interféromètre de Michelson, 1881



Interféromètre à deux ondes



Albert Abraham Michelson  
1852 - 1931



*La Physique pour Tous*

11/33

Interféromètre à 2 ondes de Michelson. Le faisceau direct traverse trois fois la lame séparatrice tandis que le faisceau réfléchi sur cette lame séparatrice ne la traverse qu'une fois, la lame compensatrice ramène à égalité le nombre de traversées. Les systèmes d'interférence obtenus dans cet interféromètre à 2 faisceaux dépendent de l'éclairage et de la disposition des deux miroirs.

## Interféromètre de Fabry et Pérot, 1899



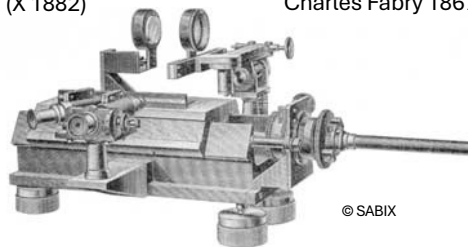
Alfred Pérot 1863-1925, (X 1882)



Charles Fabry 1867-1945, (X 1885)

*La Physique pour Tous*

Interféromètre à ondes multiples



© SABIX

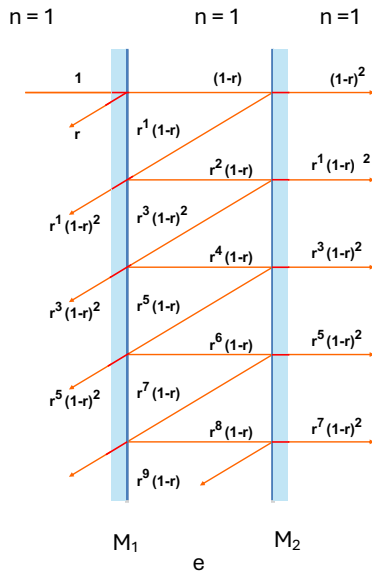
12/33

L'interféromètre optique de Fabry-Pérot est constitué de deux miroirs plans, parallèles et à fort coefficient de réflexion inventé en 1899.

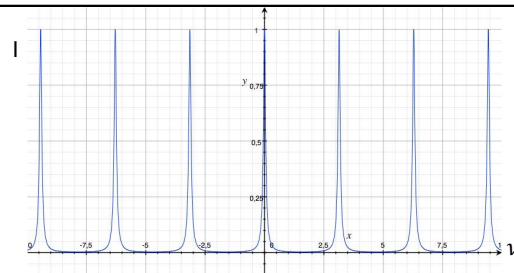
En 1913, utilisant l'interféromètre à ondes multiples mis au point avec Alfred Pérot, il confirme l'existence de la couche d'ozone.

En 1921, il est nommé professeur à la Sorbonne et il reçoit Michelson venu discuter les mérites respectifs de leurs interféromètres.

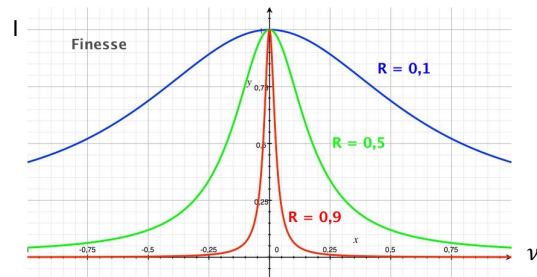
## Fabry - Péro



La Physique pour Tous



Transmittance



$R = r^2$  est la réflectance en intensité d'un dioptre  
 $r$  est la réflectance en amplitude d'un dioptre

13/33

L'interféromètre Fabry-Pérot est composé de deux miroirs  $M_1$  et  $M_2$  distant d'une épaisseur  $e$  et de réflectance  $R$ . Les faces des miroirs ne sont pas parallèles pour éviter les réflexions parasites. Sa physique est similaire à celle des lames minces (à gauche).

Si on éclaire l'instrument en lumière blanche sa transmittance a l'allure de la figure de droite, en haut. La lumière traverse l'instrument à chaque fois qu'une onde stationnaire peut s'y établir, c'est à dire chaque fois que l'épaisseur

optique peut accommoder un nombre entier de demi-longueurs d'onde  $e = n \frac{\lambda}{2}$ .

La finesse des raies transmises par l'instrument dépend de la réflectance des miroirs, plus celle-ci est grande, plus grande est la finesse c'est à dire le pouvoir de résolution spectrale.

Les Fabry-Pérot sont utilisés en spectroscopie à très haute résolution.

vitesse de la lumière

*La Physique pour Tous*

14/33

## Mesure de la vitesse de la lumière

- De l'antiquité au XVII<sup>e</sup> siècle vitesse finie grande ou infinie ?
- En 1638, Galilée échoue à mesurer la vitesse à l'aide d'obturations de lanternes éloignées.
- En 1676 Ole Rømer (Christian Römer), étudie le satellite Io de Jupiter.

Première estimation ~ 220 000 000 m/s

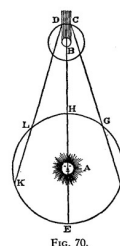


Fig. 70.

Pendant l'antiquité les questions se posent de savoir si la lumière était une quantité dotée ou non de mouvement et dans le cas d'un mouvement de savoir si la vitesse est finie ou infinie, sans qu'il ne soit possible de trouver une réponse. Les questions se posent à nouveau avec l'avènement de la méthode scientifique. Au XVII<sup>e</sup> siècle règne le consensus de la lumière quantité en mouvement dont il convient de déterminer la vitesse. Avant 1638, Galilée imagine d'utiliser des lanternes obturables distantes, mais n'obtiendra aucun résultat.

La première estimation significative est due à Christian Römer à l'observatoire de Paris qui découvre que la période orbitale de Io, le satellite de Jupiter, varie suivant la distance entre la Terre et Jupiter. Il déduit de ses mesures qu'il faut 22 minutes à la lumière pour parcourir le diamètre de l'orbite terrestre (l'orbite est très proche d'un cercle). Combinant ce résultat avec une estimation du diamètre de l'orbite terrestre, Christian Huygens établit la vitesse de la lumière à 220 000 km/s.


### Vitesse de la lumière, 1849

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

D = 8,6 km

Suresnes  
observateur  
miroir ½ transparent

Montmartre  
miroir



Hippolyte Fizeau  
1819-1896

La Physique pour Tous

16/33

Mesure physique de la vitesse de la lumière par Hyppolite Fizeau en 1849. Un faisceau de lumière collimaté est produit à Suresnes à l'aide d'une source de lumière et d'un télescope. Le faisceau est envoyé sur la face hypoténuse d'un prisme droit isocèle ; la moitié du faisceau passe à travers le prisme et est perdue ; l'autre moitié est réfléchi vers Montmartre où il se réfléchi sur un miroir à travers un autre télescope qui maintient la collimation.

La lumière passe entre deux dents de la roue ; on change la vitesse de rotation de la roue jusqu'à obtenir une extinction du faisceau retour ; cette extinction correspond à l'interposition de la dent suivante sur le trajet du faisceau ; connaissant la vitesse de rotation de la roue mesurée à l'aide de compte-tour mécaniques placés dans le dispositif d'entraînement et d'un chronomètre on déduit la durée de l'aller-retour de la lumière dans le dispositif ; connaissant la distance entre Suresnes et Montmartre on en déduit la vitesse de la lumière. Le temps d'aller-retour de la lumière est d'environ  $5,5 \cdot 10^{-5} \text{ s} = 55 \mu\text{s}$ . La roue de 720 dents tournait à la vitesse de 25 tours par seconde.



## Vitesse de la lumière dans l'eau, 1850

Théorie corpusculaire :  $V_{air} < V_{eau}$

298 000 km/s  $\pm$  500 km/s

Théorie ondulatoire :  $V_{eau} < V_{air}$

En 1850, à l'aide d'un dispositif à miroir tournant plus précis, Foucault établit que la lumière est plus rapide dans l'air que dans l'eau.



Léon Foucault  
1819 - 1868

La théorie corpusculaire est définitivement falsifiée

$c = 299\,792\,458$  m/s

La Physique pour Tous

17/33

À la demande de Leverrier, le découvreur de Neptune, Léon Foucault, alors physicien de l'observatoire de Paris, construit un dispositif à miroir plus précis pour la mesure de la vitesse de la lumière, Grâce à son instrument il put mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau, trouvant qu'elle était plus petite d'environ 30%,  $n = 1,33$ . Il put ainsi falsifier la théorie corpusculaire de la lumière chère à Newton.

naissance de l'électromagnétisme

## Les pionniers



Hans Christian Ørsted  
1777-1851



André-Marie Ampère  
1775-1836



Michael Faraday  
1791-1867

Ørsted : un fil parcouru par un courant agit sur une boussole, 1820

Ampère : 2 fils parcourus par des courants s'attirent ou se repoussent, 1820

Faraday : un aimant met en mouvement un fil parcouru par un courant, 1821

19/33

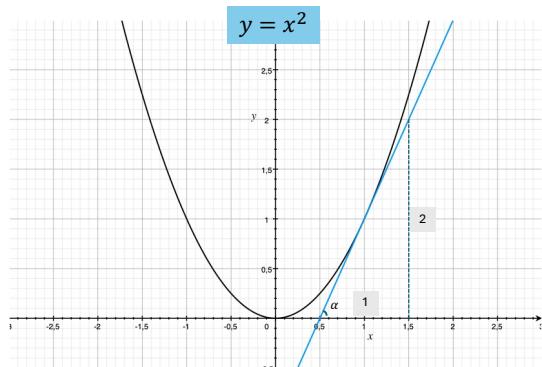
En 1820, Ørsted découvre avec stupeur qu'un fil conducteur parcouru par un courant électrique dévie l'aiguille d'une boussole. Jusqu'alors magnétisme et électricité étaient des domaines physiques indépendants.

Stimulé par le travail d'Ørsted, Ampère découvre que deux fils électriques s'attirent si les courants qui les parcourent sont de même sens et qu'ils se repoussent si les courants sont de sens opposés, il découvre ainsi qu'un courant électrique crée un champ magnétique. Ampère unifie deux champs de connaissance jusqu'alors considérés comme indépendants : l'électricité et le magnétisme, avec le théorème qui porte son nom et qui permet de calculer le champ magnétique créé par un courant électrique.

Faraday, inversant l'expérience d'Ørsted, découvre qu'un fil électrique peut être mis en mouvement par un aimant. Il met au point le premier moteur électrique inversible en dynamo.

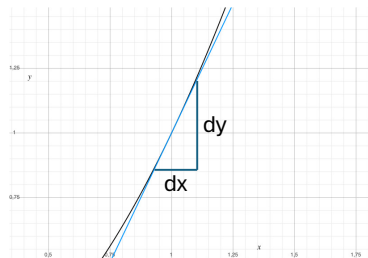
## Tangente et dérivée

Calcul de la tangente en  $x = 1$



- point de vue géométrique

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x} = \frac{2}{1} = 2 \quad \text{pente de la tangente}$$



quand  $x \rightarrow 0$   $\frac{dy}{dx}$  est la dérivée de  $y$

la dérivée d'une fonction mesure la « vitesse » de variation de la fonction en chaque point

$$\frac{dx^n}{dx} = n x^{n-1}$$

20/33

La Physique pour Tous

La tangente en un point d'une courbe coupe cette courbe en un point unique en restant du même côté de l'espace. On a choisi ici, la parabole  $y = x^2$  comme fonction d'étude. Dans l'interprétation géométrique de la tangente on mesure la pente de la droite par la tangente de l'angle qu'elle fait avec l'axe des  $x$  (d'où son nom). En construisant le triangle rectangle donnant la pente on obtient  $\operatorname{tg} \alpha = \text{côté opposé de l'angle droit} / \text{sur côté adjacent} = 2/1 = 2$ .

D'un point de vue algébrique on calcule la quantité  $\frac{dy}{dx}$  dans la notation proposée par Leibniz en 1684, où  $dx$  et  $dy$  sont des quantités infinitésimales. La pente de la tangente en un point est donnée par  $\frac{dy}{dx} = \frac{y(x+h) - y(x)}{h}$ , quand  $h \rightarrow 0$  appliquée à la fonction étudiée au point  $x$  on obtient  $\frac{dy}{dx} = 2x$  et on retrouve bien que la pente de la tangente en  $x=1$  vaut 2.

La dérivée d'une fonction donne une mesure de la variation instantanée de cette fonction dans sa variable.

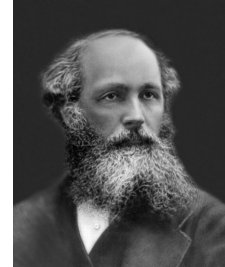
## Équations de Maxwell, 1865

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Loi de Gauss pour le champ électrique}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Loi de Gauss pour le champ magnétique}$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Loi de Faraday de l'induction magnétique}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{Loi d'Ampère-Maxwell}$$



James Clerk Maxwell  
1831-1879

Maxwell a introduit une correction au théorème d'Ampère

La variation d'un champ magnétique crée un champ électrique

La variation d'un champ électrique crée un champ magnétique

$\nabla$  signe nommé nabla

La Physique pour Tous

21/33

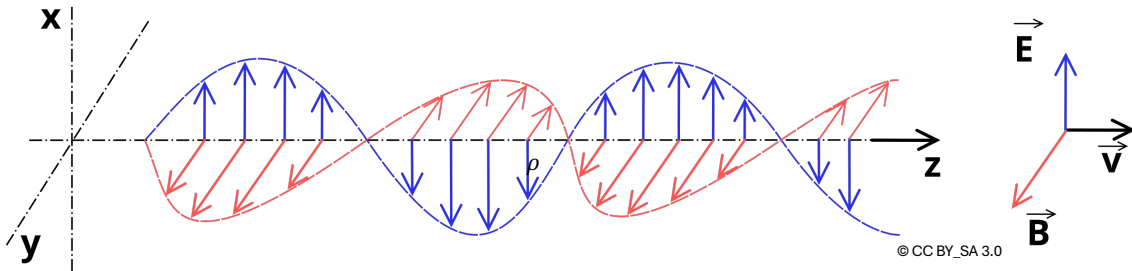
40 ans plus tard, en 1865 James Clerk Maxwell, publie une synthèse de l'électricité et du magnétisme : l'électromagnétisme. Cette synthèse comporte 20 équations à 20 variables qui aujourd'hui se réduisent à 4 dans des notations plus compactes.

- équation 1 : Loi de Gauss donnant le champ électrique créé par une densité de charges électriques  $\rho$ .
- équation 2 : Loi de Gauss pour le champ magnétique entérinant le fait que l'on ne connaît pas de charges magnétiques.
- équation 3 : Loi de Faraday de l'induction magnétique, une variation de champ magnétique produit un champ électrique.
- équation 4 : Loi d'Ampère montrant qu'un courant électrique produit un champ magnétique.

Maxwell note que la loi d'Ampère ne rend pas compte du fait que la variation d'un champ électrique, sans courant électrique, induit un champ magnétique. Cette situation se rencontre, par exemple, lors de la charge ou la décharge d'un condensateur qui n'est traversé par aucun courant mais qui accommode une variation de champ électrique, ce qui crée aussi un champ magnétique. Il modifie donc l'équation d'Ampère en y ajoutant un terme de courant de

déplacement  $\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ . Maxwell déduit de ses équations, qu'il doit exister une onde de propagation produite par une variation de champ électrique qui induit une variation de champ magnétique ...

## Représentation d'une onde e. m. monochromatique



À partir des équations de Maxwell on obtient la vitesse de propagation des ondes e.m.

$$c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

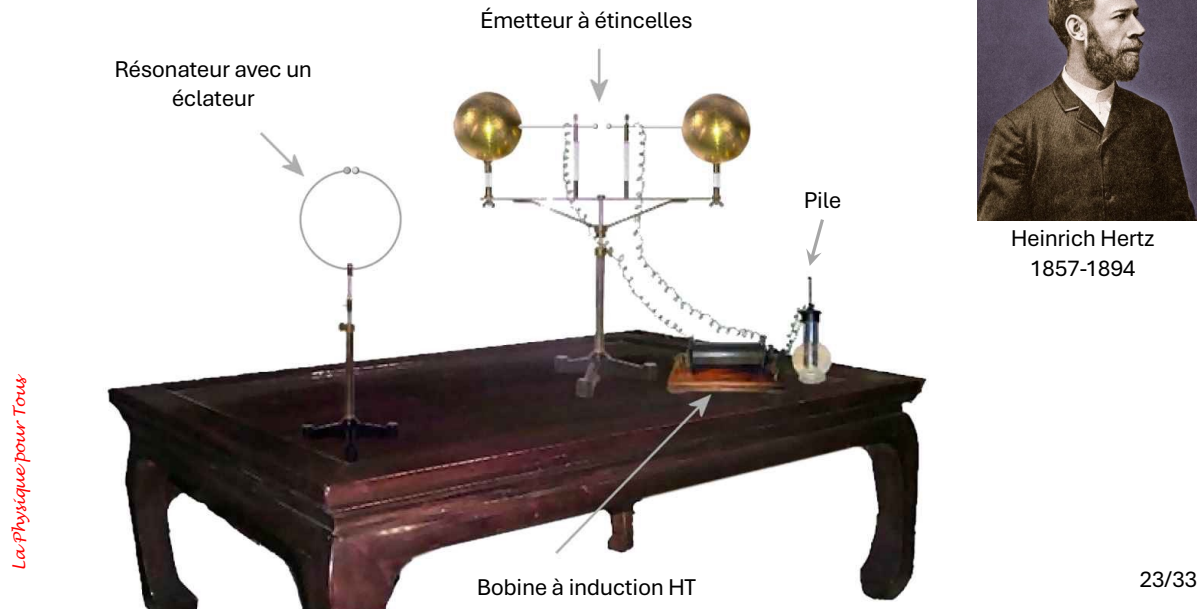
Le champ magnétique est négligeable devant le champ électrique

22/33

La Physique pour Tous

À partir des équations de Maxwell, il est possible de trouver les équations d'onde des champs électrique et magnétique et donc d'en déduire la vitesse de l'onde e. m.. Cette vitesse se rattache aux constantes électrique et magnétique du vide. La valeur théorique trouvée est très proche de la valeur de la vitesse  $c$  de la lumière mesurée expérimentalement.

## Découverte expérimentale, 1887



20 ans plus tard. Dispositif expérimental utilisé par Heinrich Hertz pour mettre en évidence les ondes électromagnétiques.

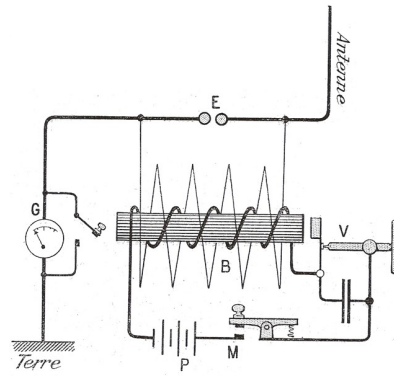
Une pile Daniel produit un courant de basse tension (1V) qui circule dans le circuit primaire d'une bobine d'induction. Autour d'un noyau de fer est enroulé un faible nombre de tours de fil de cuivre, tandis que, bobiné par-dessus, se trouve un secondaire constitué d'un grand nombre de tours de fil fin (1000 fois plus environ). Si l'on interrompt le circuit primaire, il s'y produit un courant variable d'induction qui induit un courant dans le secondaire. La tension aux bornes du secondaire est un multiple important de la tension de la pile. Plusieurs kilovolts peuvent être ainsi produits. L'ensemble des sphères et de la bobine d'induction constitue un circuit R-L-C qui oscille une fois que la haute tension produite a fait claquer l'air entre les boules de l'éclateur (étincelle). Un courant oscillant transitoire rapidement amorti s'établit. Ce courant est à l'origine d'une onde électromagnétique qui se propage jusqu'au récepteur dont la boucle fait antenne. Un courant transitoire s'établit dans la boucle qui déclenche à son tour une étincelle à l'éclateur.

Il observe à courte distance entre émetteur et récepteur une difficile reproductibilité de l'étincelle de réception. Interposant du quartz qui ne change rien, entre les deux éclateurs, il lui substitue du verre qui affaiblit les étincelles



mais les rend stables, il comprend que la lumière ultraviolette émise par l'éclateur principal est responsable de cet effet (le verre absorbe la lumière ultraviolette pas le quartz). Il vient de découvrir l'effet photoélectrique.

### Bobine à induction haute tension, Rumkorff

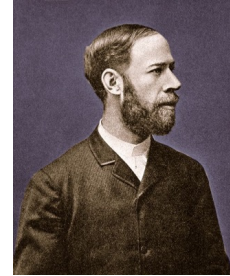
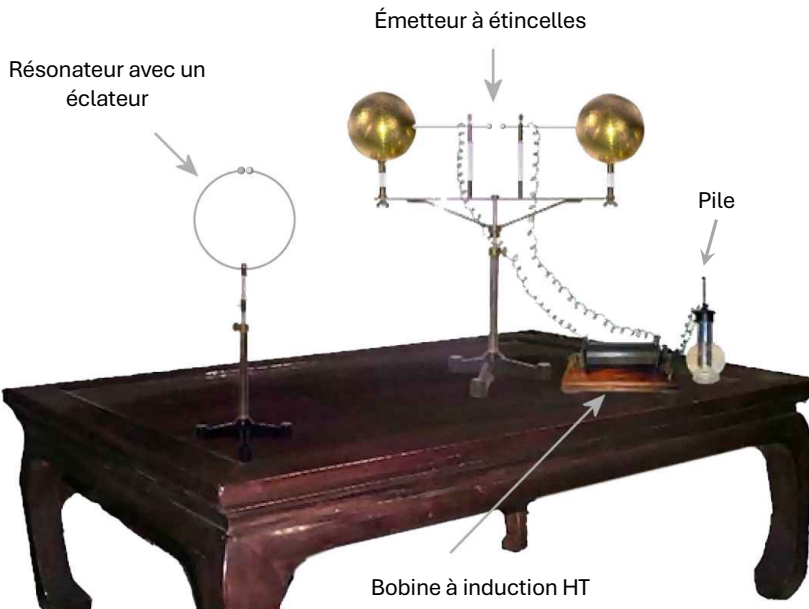


La Physique pour Tous

24/33

Schéma de principe d'une bobine de Rumkorff. Un trembleur à lame interrompt périodiquement le courant qui passe dans le primaire enroulé autour d'un noyau de fer doux et induit dans le secondaire un courant dont la tension au bornes E est dans le rapport du nombre de tours des deux enroulements. On obtient ainsi des tensions de plusieurs kilovolts déclenchant une étincelle électrique en E.

## Sur la nature de la lumière, 1887

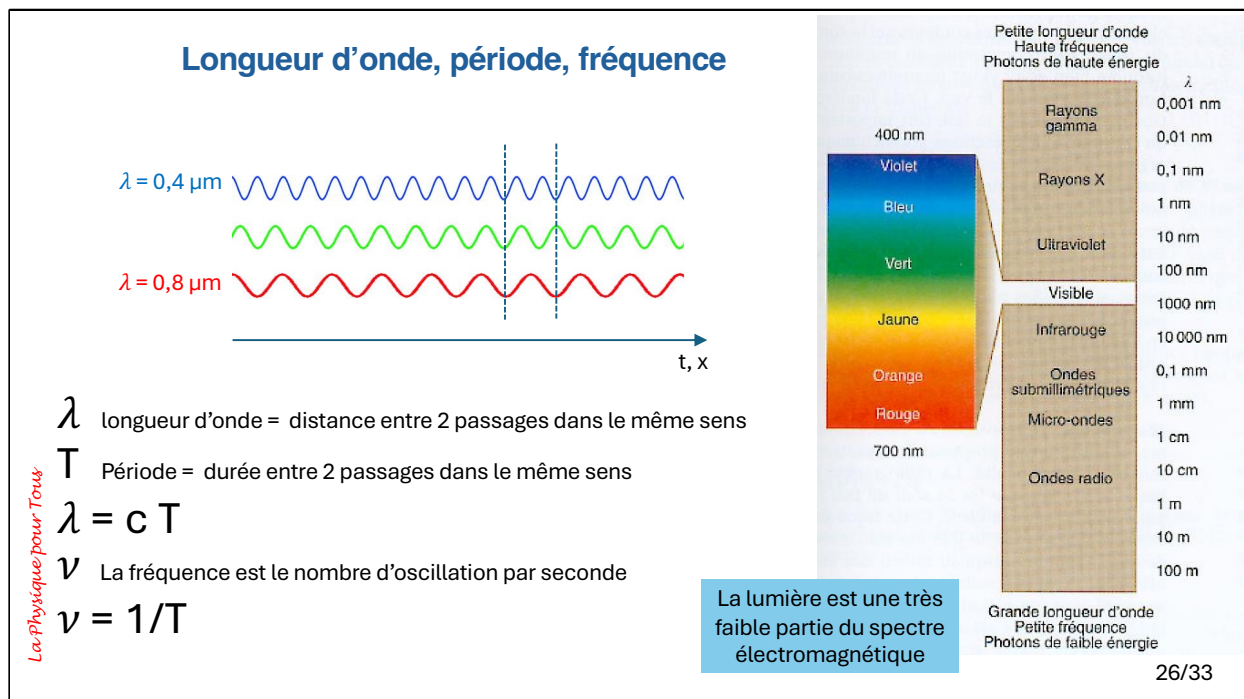


Heinrich Hertz  
1857-1894

La lumière est une onde  
électromagnétique

25/33

À l'aide de son dispositif expérimental, Hertz produit des ondes d'une fréquence de l'ordre de 100 Mhz et de longueur d'onde quelques dizaines de cm et démontre la réalité des ondes prévues par Maxwell. Il reproduit avec ces ondes hertziennes, la réfraction dans un prisme de bitume, la réflexion sur un plan métallique, la diffraction, il établit que l'onde électromagnétique est de nature transverse, donnant le sens physique de la polarisation de la lumière. La conclusion s'impose : la lumière est une onde e. m. de longueur d'onde beaucoup plus petite, quelques centaines de nm. La question qui se pose alors est celle du support de l'onde e.m.. La vitesse étant très grande on suppose que ce support, l'éther, est extrêmement rigide mais en même temps la lumière se propage dans le vide.



Une onde se propage dans l'espace. À un instant donné, la distance qui sépare deux points équivalents s'appelle la longueur d'onde  $\lambda$ . En un point donné de l'espace la durée qui sépare le passage de l'amplitude par la même valeur dans le même sens s'appelle la période  $T$ . Ces deux quantités sont reliées par la relation  $\lambda = c T$ . L'inverse de la période mesure la fréquence  $\nu$  des oscillations, c'est-à-dire le nombre d'oscillations par seconde.

Le spectre électromagnétique est une très faible partie du spectre global électromagnétique qui s'étend des rayons gamma aux ondes radio kilométriques.

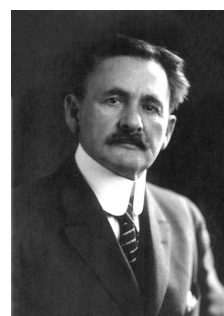
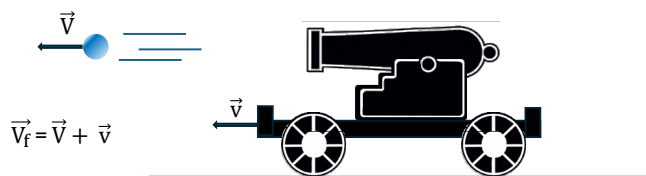
La lumière est ce que nous détectons avec nos yeux. Avec la peau nous détectons le début des infrarouges et de l'ultraviolet (bronzage). Ce spectre de détection correspond au maximum d'émission de notre étoile et a été sélectionné par la sélection naturelle. Les abeilles, par exemple, voient dans l'ultraviolet des motifs spécifiques sur les pétales de fleur qui les guident vers le nectar.

à la recherche de l'éther

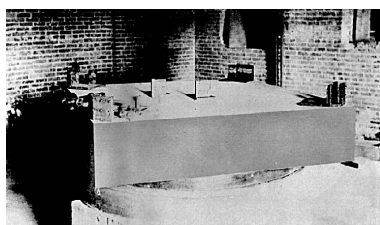
*La Physique pour Tous*

27/33

## L'expérience de Michelson et Morley, 1887



Albert Michelson  
1852-1931



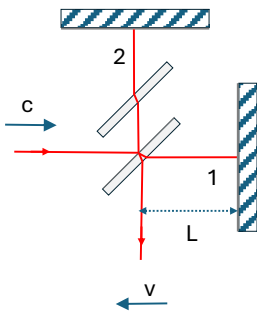
Expérience de Michelson et Morley  
1887

28/33

Michelson a cherché à savoir si la lumière respecte la loi de composition des vitesses conséquence de la relativité galiléenne, essayant ainsi d'obtenir des informations sur l'éther. Lorsqu'un canon placé sur un chariot qui se déplace à la vitesse constante  $v$  tire un boulet à la vitesse  $V$ , un observateur extérieur voit pour le boulet une vitesse qui est la somme ou la différence des deux vitesses. Michelson et Morley ont réalisé à l'aide d'un interféromètre de Michelson, une longue série de mesures pour mettre en évidence le déplacement de la Terre par rapport au référentiel fixe des étoiles. Ces expériences ont systématiquement échoué et il fallut se rendre à l'évidence : la lumière ne respecte pas la loi de composition des vitesses. La vitesse de la lumière,  $c$ , constitue une limite absolue pour les déplacements matériels ou informationnels. Cette expérience constitue un cas rare (et ici spectaculaire) de résultat négatif apportant une connaissance nouvelle d'une très grande profondeur.

## L'expérience de Michelson et Morley, 1887

v : vitesse de la Terre sur son orbite ~ 30 km/s  
c : vitesse de la lumière



La Physique pour Tous

**Bras 1** vitesse aller :  $c - v$  vitesse retour :  $c + v$

$$\text{temps aller : } \frac{L}{c - v} \quad \text{temps retour : } \frac{L}{c + v}$$

temps de parcours total :

$$\frac{L}{c - v} + \frac{L}{c + v} = \frac{L(c - v) + L(c + v)}{c^2 - v^2} = \frac{2Lc}{c^2(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

$$t_{total} = \frac{2L}{c} \frac{1}{(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{30}{300000}\right)^2 = 10^{-8} \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} \ll 1$$

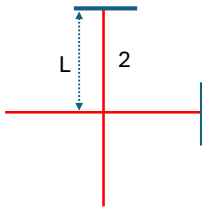
29/33

L'expérience tentée par Michelson et Morley pour mettre en évidence, support supposé de la propagation des ondes électromagnétiques conduit à des expressions complexes des temps de parcours de la lumière dans l'interféromètre. Ici le résultat dans le bras 1. Par rapport à un interféromètre immobile, le déplacement sur l'orbite terrestre introduit un terme correctif très faible dans la composition des vitesses. On reconnaît le terme correctif des équations de Lorentz de composition des vitesses pour le passage d'un référentiel galiléen à un autre quand des vitesses subluminiques sont en jeu.

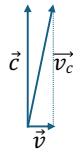
## L'expérience de Michelson et Morley, 1887

$v$  : vitesse de la Terre sur son orbite  $\sim 30$  km/s  
 $c$  : vitesse de la lumière

### Bras 2

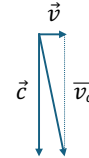


vitesse aller :



$$\sqrt{c^2 + v^2}$$

vitesse retour :



$$t_{total} = 2 \frac{L}{\sqrt{c^2 + v^2}} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}}$$

La somme de deux vecteurs orthogonaux est la diagonale du rectangle qu'ils forment

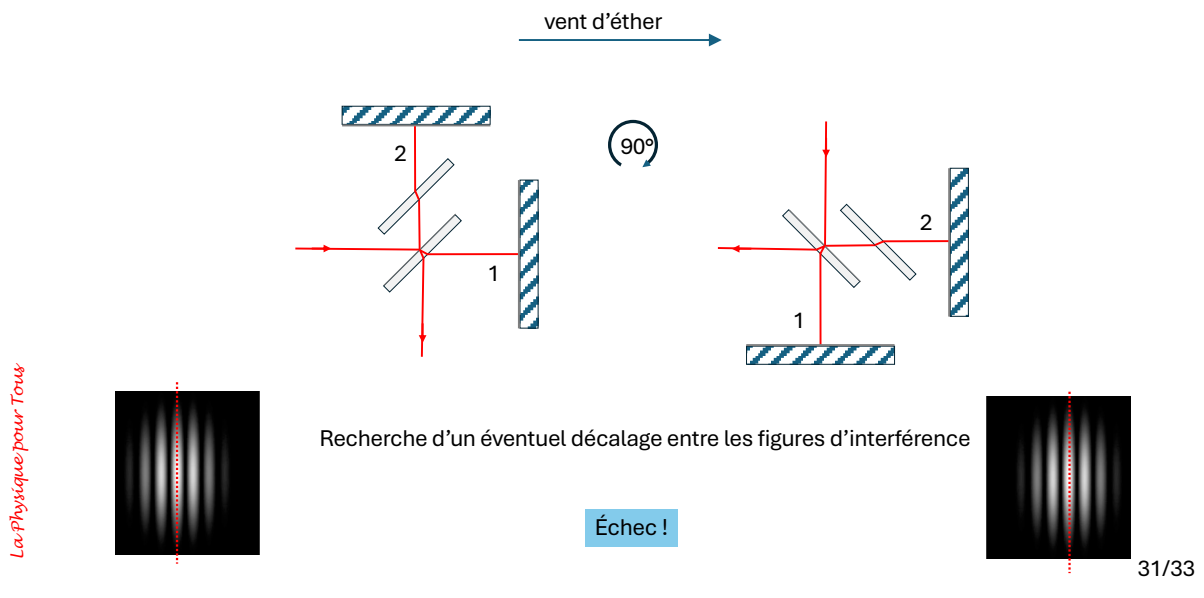
La Physique pour Tous

30/33

Dans le bras il convient de faire une composition entre la vitesse sur l'orbite terrestre de l'interféromètre et la vitesse de la lumière.



## L'expérience de Michelson et Morley, 1887

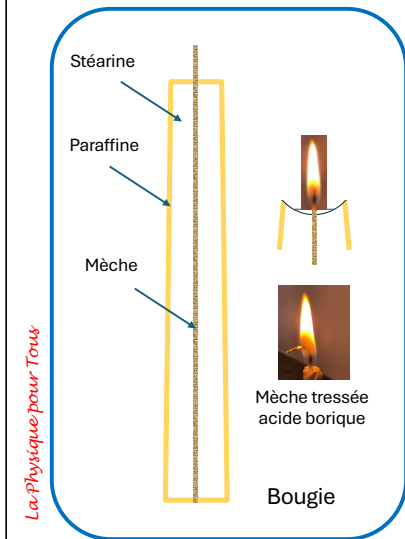


Dans l'expérience de Michelson et Morley l'éther support de la propagation des ondes e.m. est supposé constituer un référentiel fixe. Il s'agit de mesurer la combinaison des vitesses dans un référentiel fixe. M& M attendait un décalage de la figure d'interférence sur laquelle était réglée le Michelson entre deux positions à 90° l'une de l'autre. Il n'en fut rien ! Le caractère compliqué des calculs nécessaires à la description de l'expérience ont rendu difficile l'acceptation de son résultat négatif.

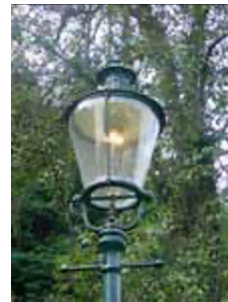
La lumière ne respecte pas la composition des vitesses

La vitesse de la lumière est un invariant physique

## Éclairage, XIX<sup>e</sup> Siècle



Lampe à pétrole



Bec de gaz



Lampe à  
filament  
1879



Thomas Edison  
1847-1931

33/33

Au XIX<sup>e</sup> siècle les moyens d'éclairage se diversifient. On voit apparaître la lampe à pétrole, l'éclairage au gaz, qui vaudra à la ville de Paris son titre de ville lumière et, en 1879, Edison invente la lampe électrique à filament.

Un mot sur la bougie. Une bougie est un objet de haute technologie.

Le corps est composé de stéarine extraite des graisses animales ou végétales par hydrogénation. La bougie est enveloppée d'une couche de paraffine, produit de la distillation du pétrole. La paraffine ayant une température de fusion plus élevée que celle de la stéarine, fond plus lentement ce qui induit la formation d'une coupelle au niveau de la flamme qui limite les débordements. La mèche est en fibre végétale tressée qui de ce fait se tord vers le bas lors de sa combustion, comme elle de plus imbibée d'acide borique, les cendres de la mèche fondent à la chaleur de la flamme et il n'est plus nécessaire de la moucher.

Edison n'est pas l'inventeur de la lampe à filament



*À suivre...*

Charles.Hirlimann@ipcms.unistra.fr

*La Physique pour Tous*





<https://ipcms-cloud.u-strasbg.fr/owncloud/s/FILvRruIXuTx8ix>