Histoire et Enseignement de la Physique

Propositions pour utiliser l'histoire de la physique avec des étudiants de licence à partir de quelques exemples

EPU 2019

Mardi 9 juillet 2019

Objectif : suivre la pensée des scientifiques tout en visant un enseignement efficace

Moyen : en actualisant leurs problématiques et les outils employés pour les résoudre.

Christian BRACCO,

Syrte, observatoire de Paris

Université de Nice Sophia-Antipolis

Les problématiques historiques ne sont pas très éloignées des problématiques modernes, un point de vue ordinaire pour les mathématiciens mais pas naturel pour les physiciens (adeptes des “révolutions”).

L’enseignement de la physique gagnerait à implémenter positivement les problématiques historiques (pas seulement à s’y référer) en les exprimant dans un langage contemporain (transposition didactique). Nous aborderons 4 exemples :

- L’équant de Kepler (dynamique newtonienne au premier ordre)
- L’obtention des trajectoires elliptiques des planètes par la méthode algorithmique et géométrique de Newton, sans calcul différentiel.
- Le cheminement de Fresnel dans la théorie de la diffraction
- Les transformations de Lorentz de 1895 (au premier ordre en V/c) comme modification simple des transformations galiléennes

Permet d’aborder les problématiques de manière vivante, et en retour, de mieux les comprendre.

L’équant de Kepler

Newton au premier ordre en l’excentricité

C.B. et J.-P Provost, Had Mars not existed: Kepler’s equant model and its physical consequences, *Eur. J. of Phys.*, 30 (2009), 1085-1092.

L’équant : un outil géométrique puissant utilisé dès l’Antiquité

Pour Hipparque (IIe siècle avant J.-C.), le Soleil se déplace uniformément sur un cercle excentré par rapport à la Terre (figure 2a ci-dessous). La distance *CT* est l’excentricité.

Excentrique

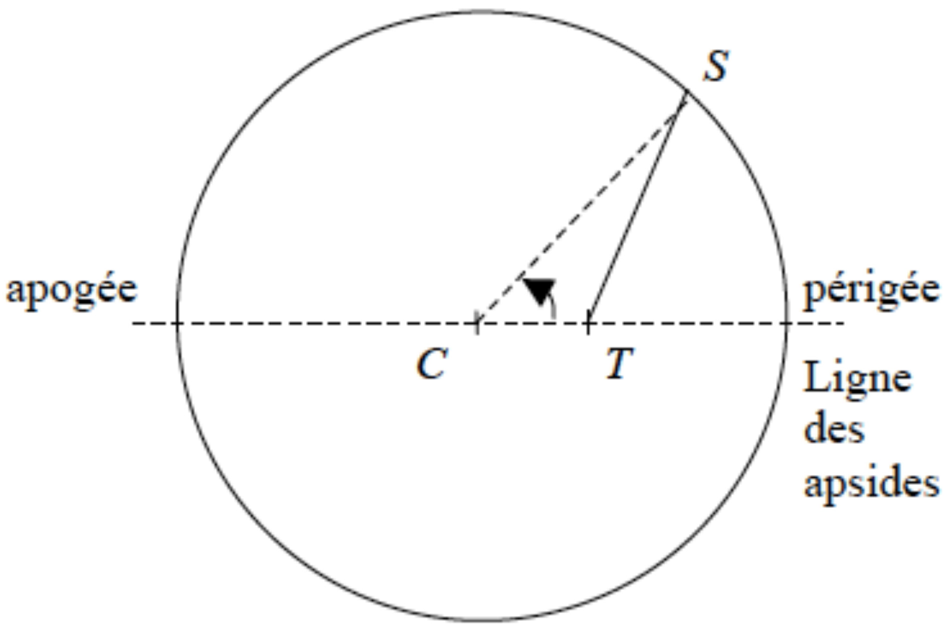


Fig. 2a. *Excentrique.* La rotation du Soleil est uniforme par rapport à *C*.

Équant

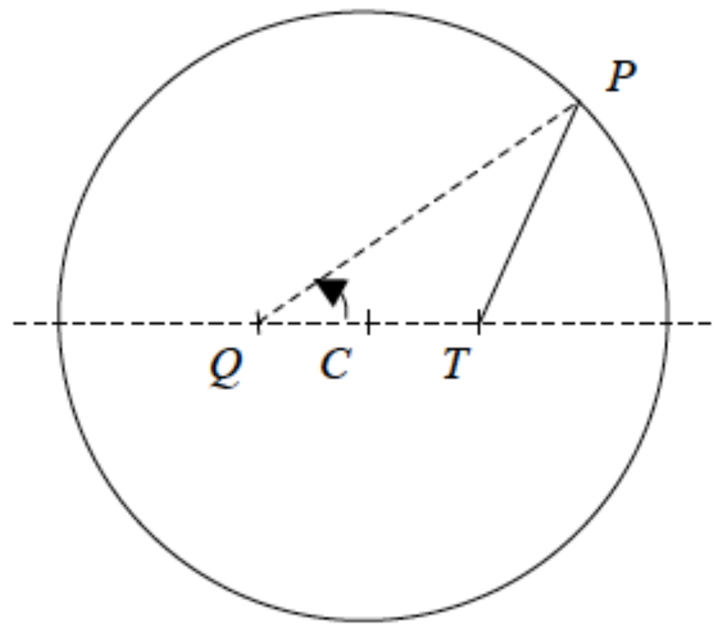


Fig. 2b. *Équant.* La rotation de la planète est uniforme par rapport au point *Q* symétrique de *T* par rapport à *C*.

Ptolémée : Système géocentrique. Modélisation du mouvement d'une planète à partir de la combinaison d'un équant et d'un épicycle.

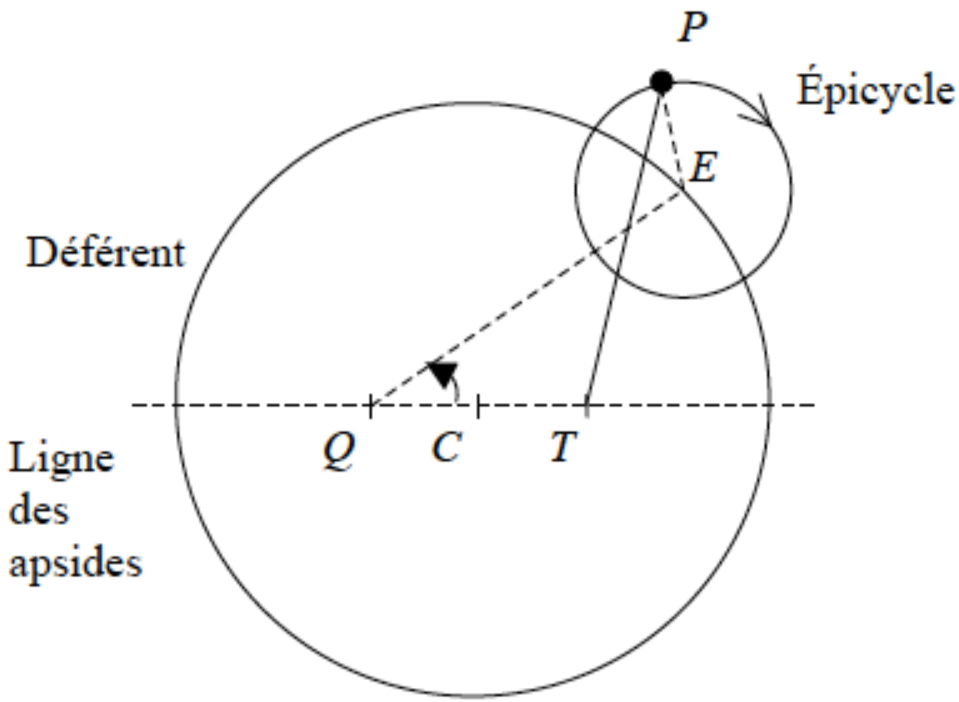
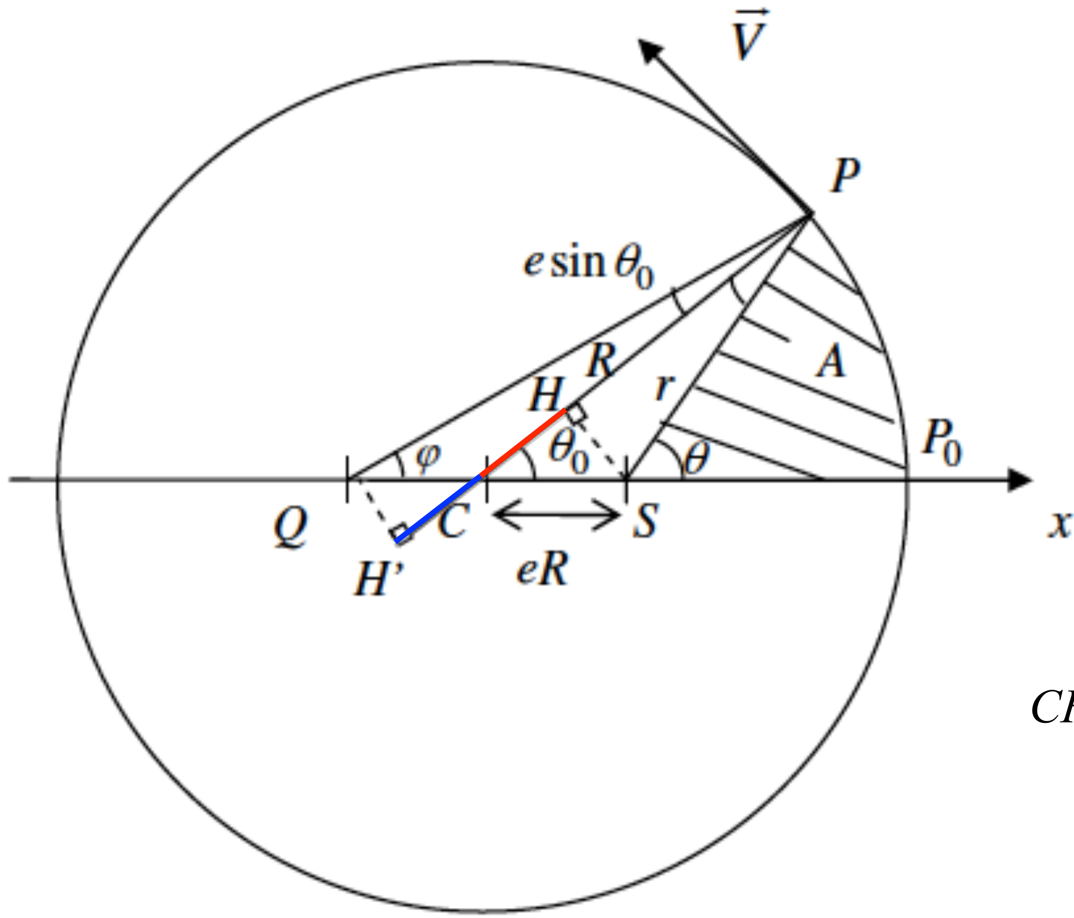


Fig. 3. *Épicycle*. Le centre E de l'épicycle décrit le déférent (équant) et son mouvement est uniforme par rapport à Q. La planète P circule sur l'épicycle. La Terre est en T.

Copernic : Système héliocentrique. Rejet (idéologique) de l'équant et conservation des épicycles

Kepler : Système héliocentrique. Rejet (physique) des épicycles et conservation de l'équant. Utilisation pour toutes les planètes, y compris la Terre. Problème pour Mars.

Vérification de la 1ère loi de Kepler.

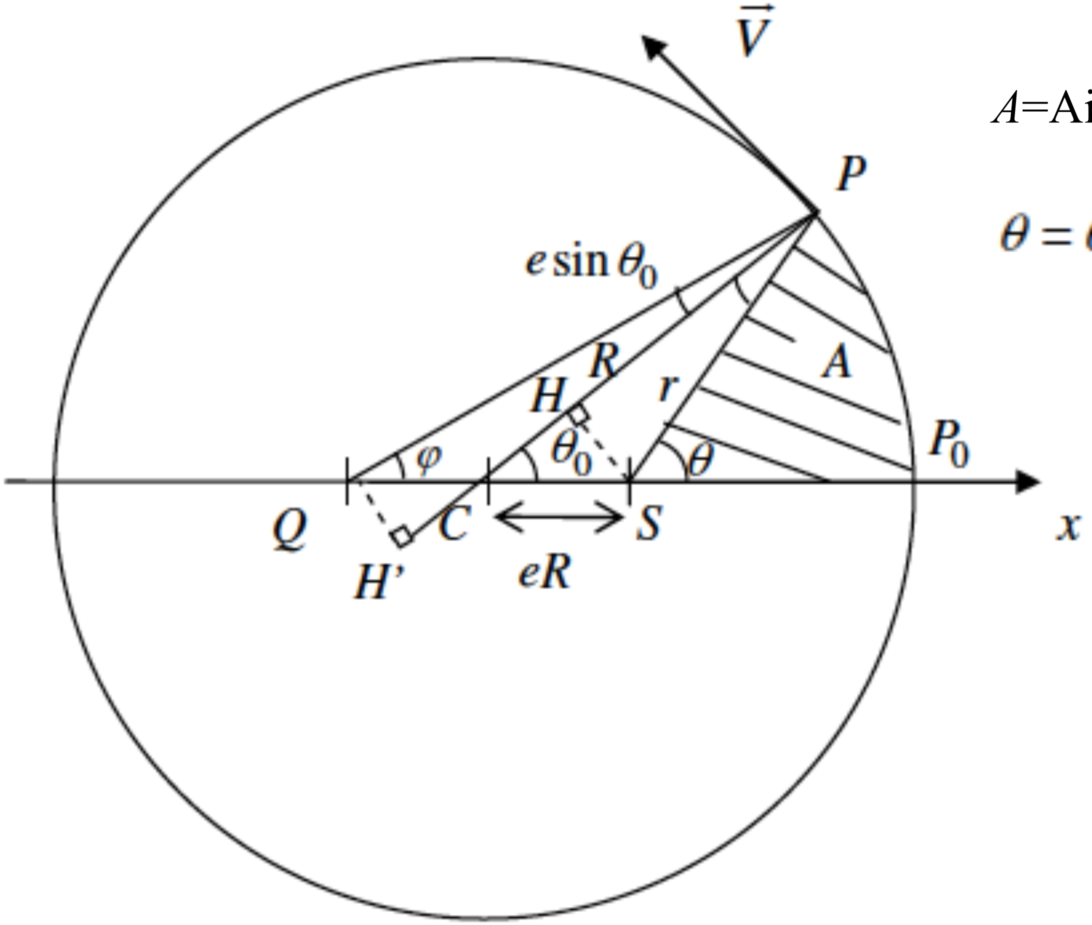


$CH=CH'=eR\cos\theta_0$

$SP+QP=2R=cste$

Ellipse!

Vérification de la 2nde loi de Kepler :



$\mathcal{A}$=Aire (P_0SP)=Aire(P_0CP)-Aire(SCP)

$$\theta = \theta_0 + e\sin\theta_0 \quad ; \quad \varphi = \theta_0 - e\sin\theta_0$$

$$A = \frac{R^2}{2}(\theta_0 - e\sin\theta_0) = \frac{R^2\varphi}{2}.$$

$$\Delta A = \frac{K\Delta t}{2}, \quad \text{avec} \quad K = R^2\omega.$$

Loi des aires

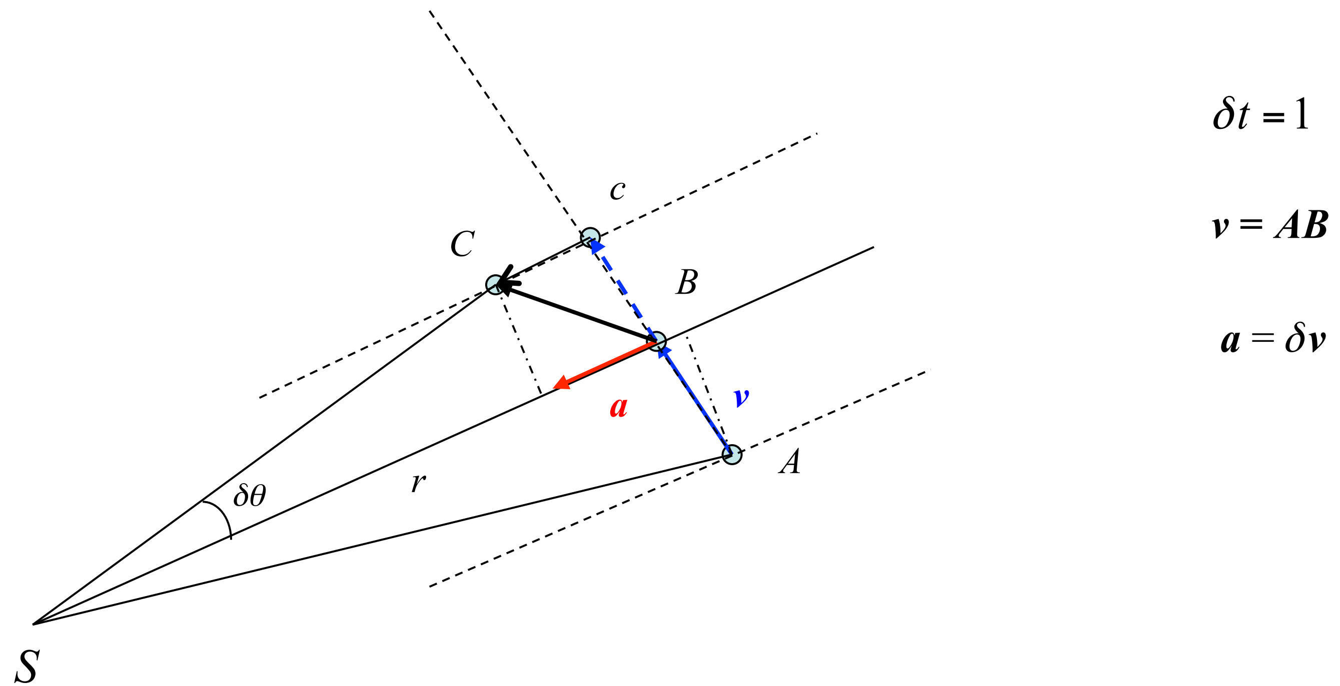
On peut aussi obtenir la 3ème loi et l'accélération centripète en $1/r^2$

La méthode algorithmique et géométrique de Newton pour la détermination des trajectoires elliptiques revisitée

sans équations différentielles

Newton, *De motu corporum in gyrum,* 1684
D.L et J.R. Goodstein, *Feynman lost lecture: the motion of planets around the sun*

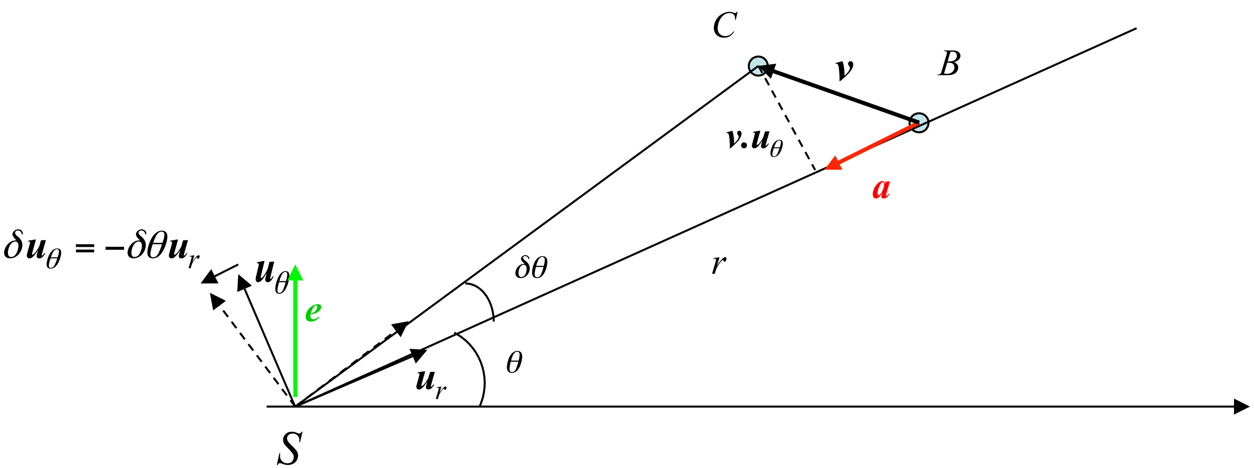
J.-P. Provost et C. B., A simple derivation of Kepler's law without solving differential equations, *Eur. J. of Phys.*, 30 (2009), 581-586.



Aire (SAB)=Aire (SBC)

Loi des aires (force centrale) : en des durées égales, le rayon vecteur SP balaie des aires égales (seconde loi de Kepler).

$$r^2 \delta\theta = K \qquad\qquad (K = \mathrm{Cste})$$



$$\boldsymbol{a} = -\frac{\alpha}{r^2}\boldsymbol{u}_r$$

$$\delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{a}, \quad r^2\delta\theta = K$$

$$\delta \boldsymbol{v} = -\frac{\alpha}{K}\delta\theta \boldsymbol{u}_r$$

$$\delta \boldsymbol{v} = \frac{\alpha}{K}\delta \boldsymbol{u}_\theta$$

$$\boxed{\boldsymbol{v} = \frac{\alpha}{K}\left(\boldsymbol{u}_\theta + \boldsymbol{e}\right) \qquad (1)}$$

(hodographe)

$$\boldsymbol{v}.\boldsymbol{u}_\theta = r\delta\theta = \frac{K}{r}$$

$$(1) \xrightarrow{.\boldsymbol{u}_\theta} \frac{K^2}{r} = \alpha\left(1 + e\cos\theta\right)$$

$$\boxed{r = \frac{p}{\left(1 + e\cos\theta\right)}, \quad \left(0 \le e < 1 \ ; \ p = K^2/\alpha\right)}$$

Les trajectoires des planètes sont des ellipses, dont le Soleil occupe un foyer (Première loi de Kepler).

La diffraction de la lumière

Les mémoires présentés par Augustin Fresnel à l'académie

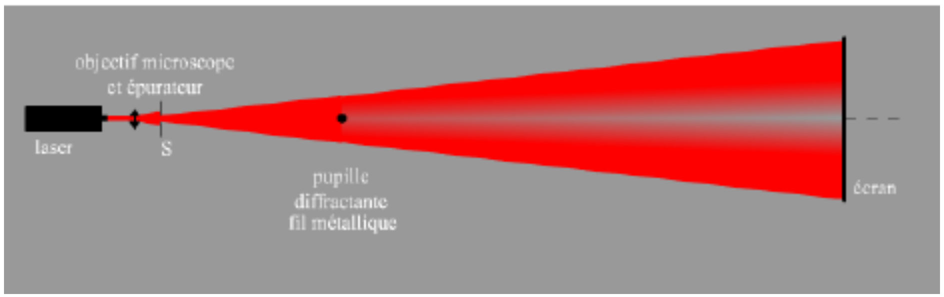
Comment appréhender par étapes successives le phénomène de diffraction

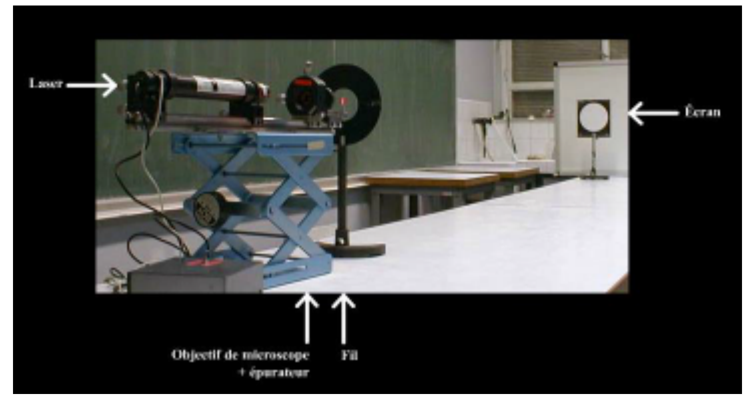
C. Bracco, G. Krebs, R. Charrier et F. Albrecht, *Cédérom Histoire des idées sur la lumière, de l'Antiquité au début du XXe siècle,* (CRDP de Nice : 2004).

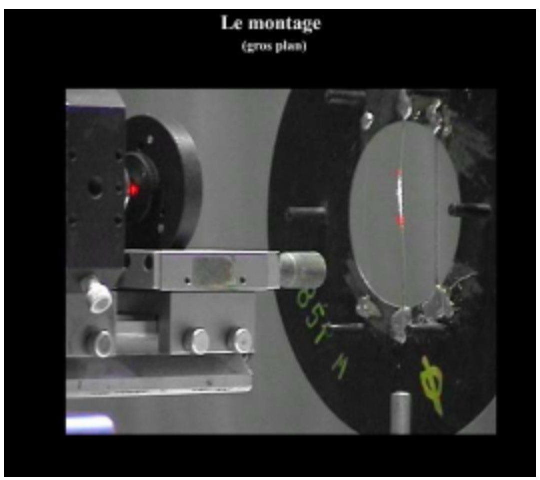
Premier mémoire sur la diffraction : 1815.

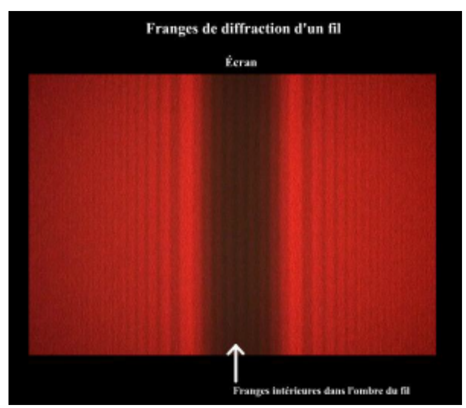
Lumière du soleil entrant par un très petit trou percé dans un écran opaque ; goutte de miel qui joue le rôle de lentille de très courte focale (point lumineux). Vitrail rouge. Fil de 1 mm d'épaisseur sur le trajet de la lumière.

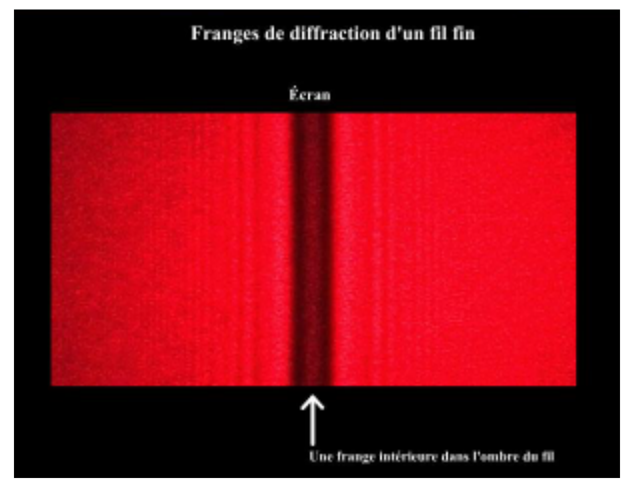
Fresnel observe l'ombre portée de quelques centimètres à quelques mètres de l'obstacle et relève la position des franges de diffraction avec un réticule constitué de fils très fins montés sur un cadre placé au foyer d'une loupe.



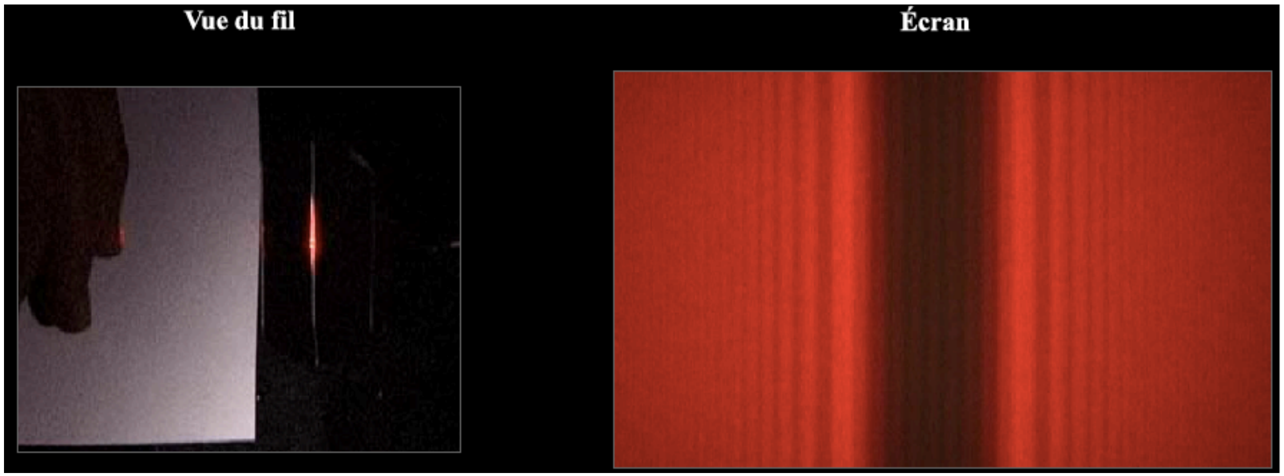


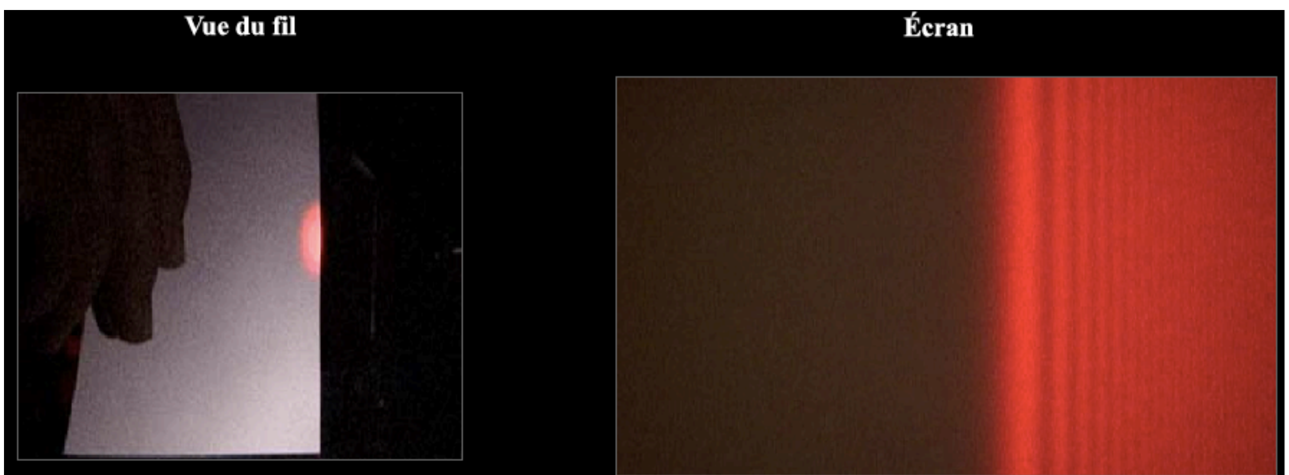






« J’avais déjà collé plusieurs fois un petit carré de papier noir sur un côté du fil de fer dont je me servais dans mes expériences, et j’avais toujours vu les franges de l’intérieur de l’ombre disparaître vis-à-vis de ce papier : mais je ne cherchais que son influence sur les franges extérieures et je me refusais en quelque sorte à la conséquence remarquable où me conduisait ce phénomène. Elle m’a frappé dès que je me suis occupé des franges intérieures, et j’ai fait sur-le-champ cette réflexion : puisqu’en interceptant la lumière d’un côté du fil on fait disparaître les franges intérieures, le concours des rayons qui arrivent des deux côtés est donc nécessaire à leur production ».





Gisèle Krebs

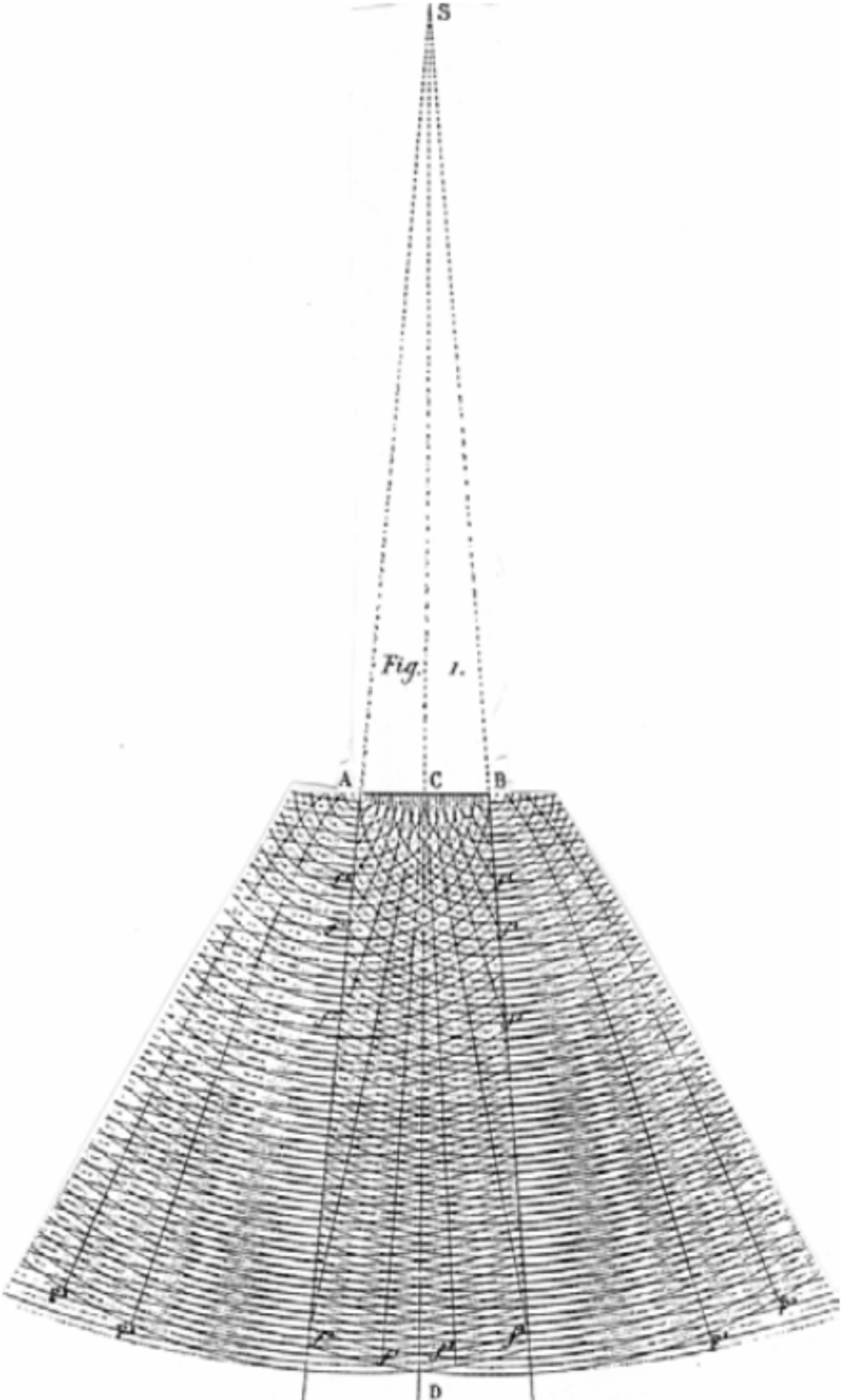
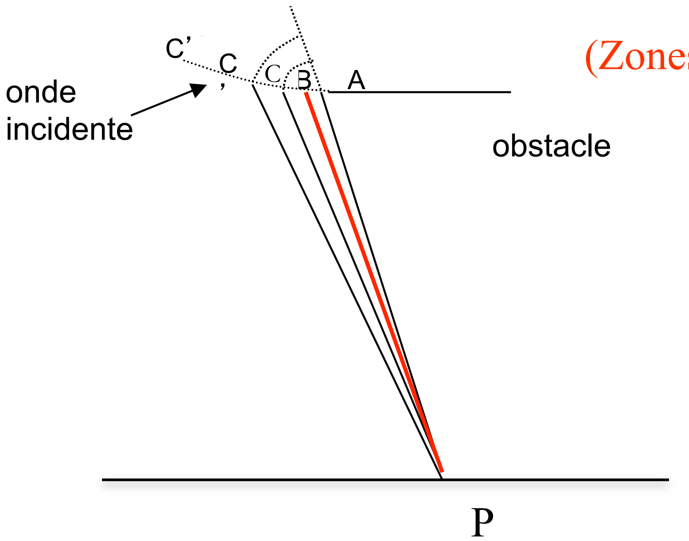


Fig. 1.

Second mémoire sur la diffraction.

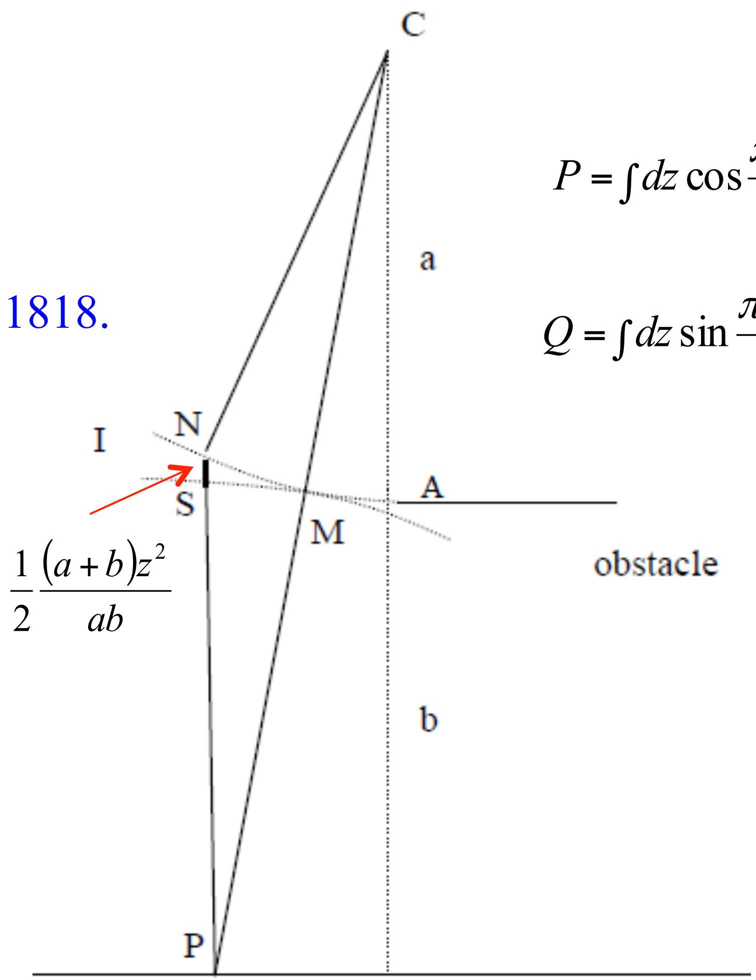


(Zones de Fresnel)

Mémoire couronné sur la diffraction : 1818.

Principe de Huygens-Fresnel

Intégrales de Fresnel



$$P = \int dz \cos \frac{\pi z^2 (a+b)}{ab\lambda}$$

$$Q = \int dz \sin \frac{\pi z^2 (a+b)}{ab\lambda}$$

$$I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

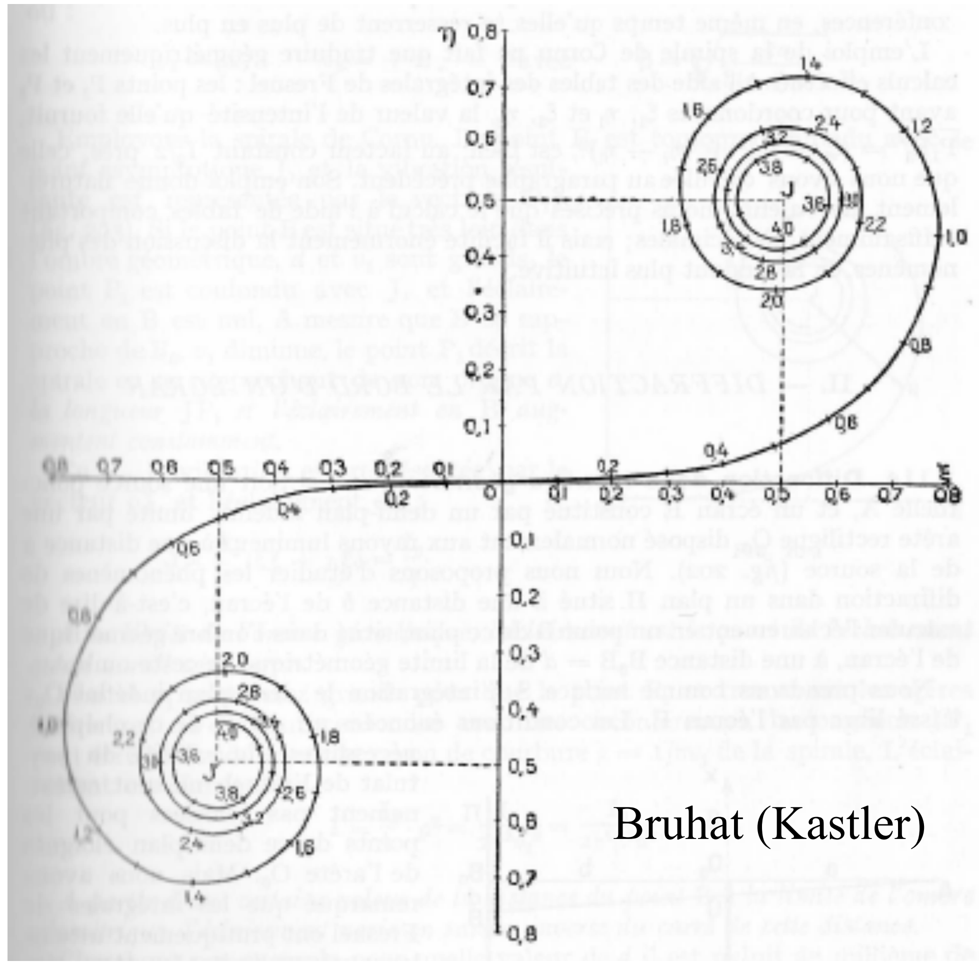
Spirale de Cornu

mathcurve.com : Bernoulli (1705), Euler (1743), Fresnel (1818), Cornu (1874), Cesaro (1886).

$$\eta = \int_0^t \sin \frac{\pi v^2}{2}\, dv$$

Propriété : courbure proportionnelle à l'abscisse curviligne.

… Fresnel se plaignait vers 1810 d'avoir été envoyé en Vendée pour « niveler de petites portions de route, chercher dans les environs des bancs de cailloux ».



$$\xi = \int_0^t \cos \frac{\pi v^2}{2}\, dv$$

Bruhat (Kastler)

Clothoïde (grec *klothein* : filer la laine) : la forme de la courbe rappelle la forme du fil qui s'enroule autour du métier à tisser ; Clotho était celle des trois Parques qui filait la destinée des hommes.

La relativité au premier ordre en *V/c*

Des transformations de Lorentz de 1895
à la relativité d'Einstein

C. B. et J.-P. Provost, La relativité d'Einstein au premier ordre : remarques pédagogiques et historiques, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 963 (2014), 533-546.

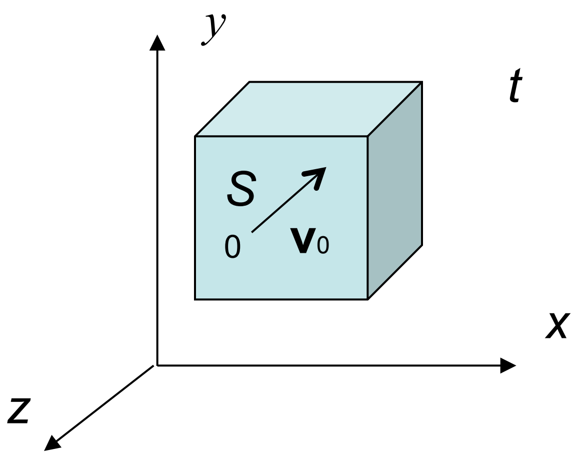
J.-P. Provost et C. B., The 1895 Lorentz transformations: historical issues and present teaching, *European Journal of Physics,* 37 (2016), in *Higlights* 2016.

J.-P. Provost et C. Bracco, 1895 Lorentz transformations, Einstein principle of equivalence and the perihelion advance of Mercury, *European Journal of physics,* 39/6 (2018).

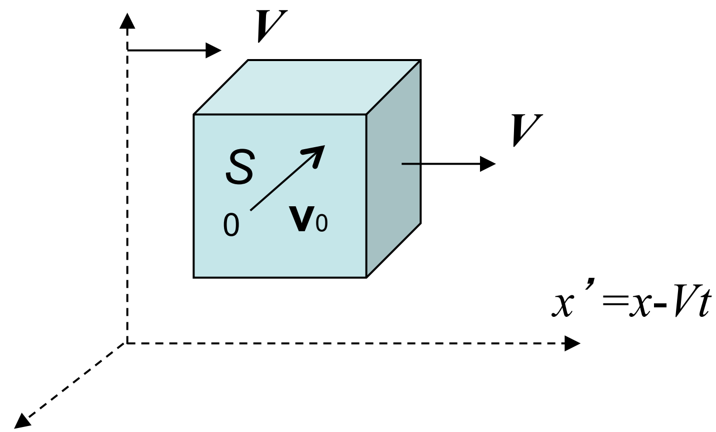
“Des exemples similaires [induction], tout comme l’essai infructueux de détecter le mouvement de la Terre relativement au “medium de la lumière”, nous amène à la supposition que non seulement en mécanique, mais aussi en électrodynamique, aucune propriété des faits observés ne correspond au concept de repos absolu ; et que dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont vraies, les équations électrodynamiques et optiques équivalentes sont également vraies, comme il a déjà été montré par l’approximation au premier ordre des grandeurs [en V/c]”.

Électrodynamique des corps en mouvement,
Introduction. Albert Einstein, juin 1905.

Lorentz 1895 (*Versuch*) : diélectriques en mouvement et « *principe des états correspondants* ».



Système « *au repos* » dans l'éther :
v_0, $\rho_0(r,t)$, E_0, B_0 ...



Système en « *mouvement global* » :
$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + V$, $\rho = \rho_0$ (boost galiléen); E, B …?

Lorentz cherche un changement de variables x', y', z', t', E', B' (et pas de référentiel) afin de résoudre les éq. [de Maxwell] pour S … en faisant en sorte que dans les nouvelles variables, elles ressemblent si possible à celles pour S_0 : explication de l'échec de la détection du mouvement « absolu » de la terre par rapport à l'éther par des expériences optiques, et plus généralement électromagnétiques, au premier ordre en V/c).

$$\boxed{\begin{aligned} x' &= x - Vt \\ t' &= t - \boxed{Vx/c^2} \end{aligned}}$$

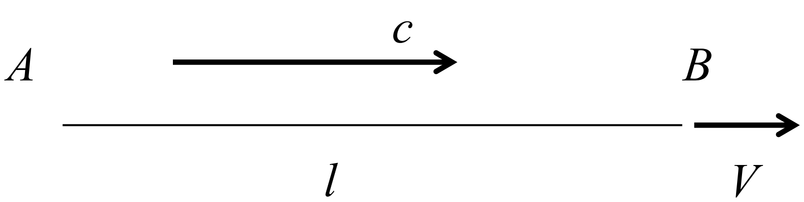
t' temps local
(variable fictive pour Lorentz)

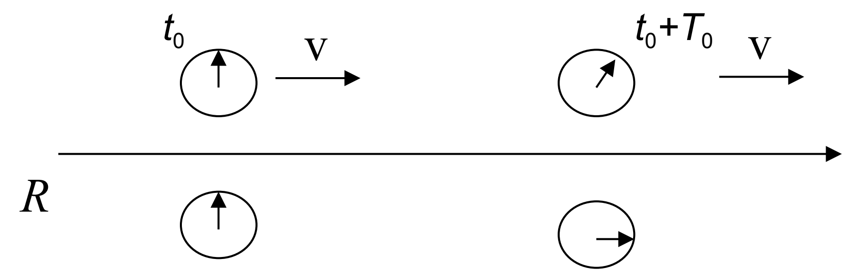
$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}$$
$$\vec{B}' = \vec{B} - \boxed{\vec{V} \wedge \vec{E}/c^2}$$

Obtention formelle à partir de l'écriture des équations de Maxwell

H. Poincaré, *La théorie de Lorentz et le principe de réaction* (*Jubilé* pour Lorentz, 1900)

Dans le §3, Poincaré interprète le *temps local* de Lorentz $t' = t - vx/c^2$ comme étant le temps indiqué par les horloges de deux observateurs distants qui les ont synchronisées par des signaux lumineux, ignorant leur mouvement de translation dans l'éther (c invariant).

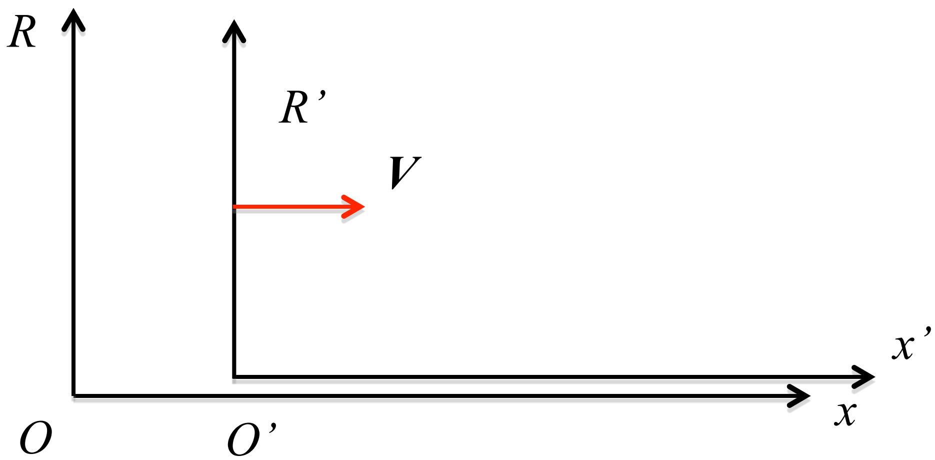




Réception du signal par B à $t'_{rB} = l/c$ dans son référentiel et à $t_{rB} = l/(c-V)$ dans le référentiel au repos (i.e. de l'éther) ; ce qui conduit immédiatement à $t'_{rB} = t_{rB} - Vx_{rB}/c^2$

Rem: si $\Delta t = 0$, $\Delta t' \neq 0$ en général ; relativité de la simultanéité qui sera rappelée en 1902 [1898] par Poincaré dans *Science et Hypothèse :* « *nous n'avons pas* [l'intuition directe] *de la simultanéité de deux évènements qui se produisent sur des théâtres différents* ».

Autre lecture (Max Abraham, mars 1905)



$$x' = x - Vt \quad (1)$$

Équation d'un rayon lumineux dans R : $x = c\,t$; dans R' : $x' = c\,t'$ (invariance de c)

Par substitution dans (1) : $ct' = ct - Vx/c$ soit $t' = t - Vx/c^2$ (2)

$$\Delta x' = \Delta x - \Delta dt \quad (1)$$

$$\Delta t' = \Delta t - V\Delta x/c^2 \quad (2)$$

(1) / (2) : $$\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\frac{\Delta x}{\Delta t} - V}{1 - V\frac{\Delta x}{\Delta t}/c^2}$$

$$v' = \frac{v - V}{1 - Vv/c^2}$$ cinématique

Cas de la lumière $v = c$: $v' = c$ (invariance de c)

Formule d'entraînement de Fresnel, 1818

Prisme d'Arago :
(Laue 1906)

$$v = \frac{v' + V}{1 + Vv'/c^2} \approx (v' + V)\left(1 - \frac{Vv'}{c^2}\right) = \left(\frac{c}{n} + V\right)\left(1 - \frac{V}{nc}\right) \approx \frac{c}{n} + \boxed{V\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}$$

Conséquences plus générales pour la lumière.

$$\vec{r}\,' = \vec{r} - \vec{V}t, \quad t' = t - \vec{V}.\vec{r}/c^2$$

De l'invariance de la phase des ondes planes

$$\omega t - \vec{k}.\vec{r} = \omega\left(t' + \vec{V}.\vec{r}\,'/c^2\right) - \vec{k}.\left(\vec{r}\,' + \vec{V}t'\right) = \omega' t' - \vec{k}\,'.\vec{r}\,'$$

Lorentz déduit $\boxed{\omega' = \omega - \vec{V}.\vec{k}\,; \quad \vec{k}\,' = \vec{k} - \vec{V}\omega/c^2}$

Dans le vide, il retrouve l' invariance de la vitesse *c*, l' effet Doppler, l'aberration

$$\vec{k}\,' = k\left(\vec{u} - \vec{V}/c\right) = \frac{\omega}{c^2}\left(\vec{c} - \vec{V}\right)$$

Exemple de passage à la relativité restreinte : les longueurs.

Longueurs

Règle mobile à la vitesse v dans R ou onde dans R : $0 < x - vt < L$ ou λ

Dans R' ($V = \varepsilon << 1$) : $0 < \left(x' + \varepsilon t'\right) - v\left(t' + \varepsilon x'\right) < L$ ou $0 < x' - v't' < L'$

avec $\boxed{L' = L(1 + \varepsilon v)}$ et $v' = v - \varepsilon\left(1 - v^2\right)$ [Fresnel] ou $\left(1 - v'^2\right) = \left(1 - v^2\right)\left(1 + 2\varepsilon v\right)$

$L/\sqrt{1 - v^2}$ est invariant, donc $\boxed{L = L_0\sqrt{1 - v^2}}$ (contraction des longueurs)

Horloges

Δt intervalle de temps dans R et $\Delta t'$ intervalle de temps correspondant dans R'

horloge mobile dans R : $x = vt$

$\Delta t' = \Delta t(1 - \varepsilon v)$ d'où $\boxed{\Delta t\sqrt{1 - v^2} = \text{invariant} = \Delta t_0}$ (dilatation des durées)

Mais aussi les TL de 1905 (à tout ordre), la dynamique relativiste, …

Retour vers l'histoire : la problématique manquante de la contraction des longueurs chez Einstein en 1912 …

La manière d’utiliser l’histoire des sciences dans un cours de physique n’est pas unique

Il est possible de le faire sur un mode intégré à partir des problématiques d’origine