

Des principes de mouvement relatif et de réaction au postulat de relativité chez Poincaré : 1887-1905.

IAP, lundi 20 novembre 2023



Henri Poincaré (1854-1912)
vers 1895

« Les bonnes théories ont raison de toutes les objections ; celles qui ne sont que spécieuses ne mordent pas sur elles, et elles triomphent même des objections sérieuses, mais elles en triomphent en se transformant.

Les objections les servent donc, loin de leur nuire, puisqu'elle leur permettent de développer toute la vertu latente qui était en elles. Eh bien la théorie de Lorentz est de celles-là [...] ».

[Poincaré, *Jubilé* pour Lorentz, 1900]

Cours de physique de Poincaré
12 volumes publiés, 3500 pages de cours entre 1888 et 1900

Référence dans les universités et écoles d'ingénieurs au niveau international

Leçons sur la théorie mathématique de la lumière (Paris, Carré, 1889-92)

Électricité et optique, volume 1 (Paris, Carré, 1890), traduit en allemand en 1891

Électricité et optique : les théories de Helmholtz et les expériences de Hertz, volume 2 (Paris, Carré, 1891), trad. 1892

Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste, volume 1 (Paris, Gauthier-Villars, 1892)

Thermodynamique (Paris, Carré & Naud, 1892)

Leçons sur la théorie de l'élasticité (Paris, Carré, 1892)

Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste, volume 2 (Paris, Gauthier-Villars, 1893)

Théorie des tourbillons (Paris, Carré, 1893)

Les oscillations électriques (Paris, Carré, 1894)

Capillarité (Paris, Carré, 1895)

Théorie analytique de la propagation de la chaleur (Paris, Carré & Naud, 1895)

Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste, volume 3 (Paris, Gauthier-Villars, 1899)

Théorie du potentiel newtonien (Paris, Carré & Naud, 1899)

La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes (Paris, Carré & Naud, 1899)

Électricité et optique, 2nde édition : la lumière et les théories électrodynamique, (Paris, Carre & Naud, 1901)

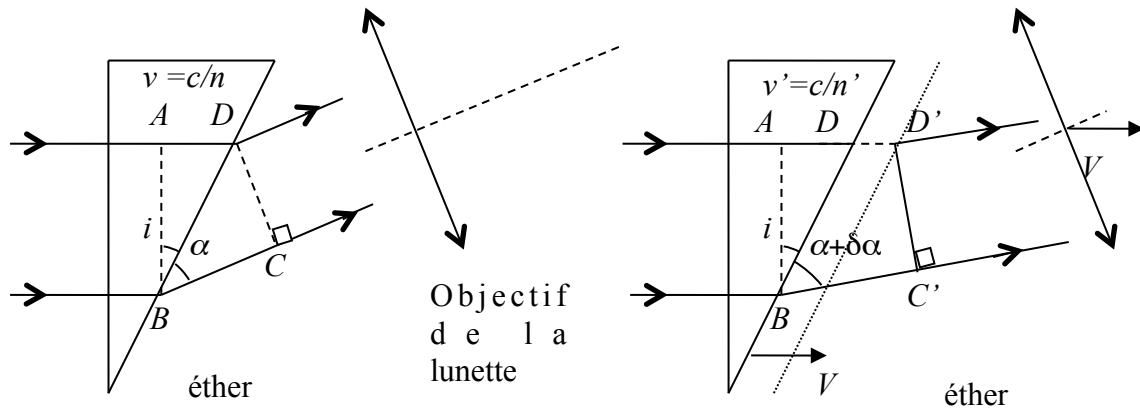
La formule d'entraînement de Fresnel (1818) – La démonstration de Poincaré dans son cours de (1887-1888)

Lettre à Arago, septembre 1818. Fresnel fait remarquer que si la lumière sort du prisme en B , elle n'en sortira pas en D quand le prisme est en mouvement à la vitesse V dans l'éther, mais en D' . L'angle des rayons à la sortie du prisme est modifié d'une **quantité exactement compensée par l'effet d'aberration** dû au mouvement de l'observateur. Il faut pour cela que la vitesse de la lumière se propageant dans le prisme en mouvement, dans l'éther, soit :

$$v = c/n + V \left(1 - 1/n^2 \right)$$

(Vérification par Fizeau en 1851, « compensation »)

Fresnel : « Le mouvement de notre globe ne doit avoir aucune influence sensible sur la réfraction apparente ».



Poincaré déduit en 1889 de la formule de Fresnel (« **entraînement partiel des ondes** ») que les **durées de propagation de la lumière** dans le prisme au repos (Δt) et en mouvement ($\Delta t'$) sont reliées par :

$$\Delta t' = \Delta t + \frac{\vec{V} \cdot \Delta \vec{r}}{c^2} \quad \text{(Invariance du principe de Fermat)}$$

« Une conséquence importante de la formule précédente est que les lois de la réflexion et de la réfraction, les phénomènes d'interférences ne sont pas affectés par le mouvement de la Terre ».

« Un un mot les phénomènes optiques ne peuvent mettre en évidence que des mouvements relatifs par rapport à l'observateur de la source lumineuse et de la matière pondérable [PMR] ».

Après que la lumière est devenue une onde électromagnétique avec Maxwell à la fin du XIX^e siècle, la **problématique de Fresnel-Arago** devient celle de l'électrodynamique des corps en mouvement.

Poincaré 1895 : À propos de la théorie de M. Larmor, *Éclairage électrique*,
4 articles : vol. 3, 5-13, 285-295 ; vol. 5 (1895), 5-14, 385-392 entre avril et novembre

Ces articles discutent la [théorie de Lorentz de 1892](#) : « La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants (160 p. en français) », de particules matérielles portant des charges électriques libres de se déplacer dans l'éther (les électrons). Elle présente un avantage déterminant aux yeux de Poincaré sur la théorie de Hertz en particulier : vérification de la [formule de Fresnel](#) à partir des équations de Maxwell dans l'éther et de l'expression de la force de Lorentz $\vec{f} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$.

Concernant la théorie de Lorentz : « **Malheureusement il reste une difficulté grave : il n'y a plus égalité entre l'action et la réaction [PRN]** » [l'« objection » de Poincaré : la théorie ne satisfait pas la condition 3° ci-dessous].

« Considérons un petit conducteur A chargé positivement et entouré d'éther. Supposons que l'éther [immobile] soit parcouru par une onde électromagnétique et qu'à un certain moment cette onde atteigne A , la force électrique due à la perturbation agira sur la charge de A et produira une force pondéromotrice agissant sur le corps A . **Cette force pondéromotrice ne sera contrebalancée au point de vue du principe de l'action et de la réaction [PRN] par aucune autre force agissant sur la matière pondérable** ».

3 conditions à remplir pour « toute théorie électrodynamique des corps en mouvement » aux yeux de Poincaré :

- « 1° [...] **rendre compte** [...] des **expériences de M. Fizeau c-à-d de l'entraînement *partiel* des ondes lumineuses**
- 2° [...] être conforme au principe de conservation de l'électricité et du magnétisme
- 3° [...] être **compatible avec le principe de l'égalité de l'action et de la réaction** »

(Poincaré traite la théorie de Hertz comme un cas d'école, car elle doit être rejetée, ne satisfaisant pas au 1°).

On peut se demander si cela tient à ce que ces théories sont incomplètes ou si ces trois conditions ne sont réellement pas compatibles, ou ne le deviendraient que par [une modification profonde des hypothèses admises](#) [Poincaré ne s'est pas encore intéressé à la théorie de Lorentz de 1895, avec l'introduction du [temps local](#)].

Généralisant son étude, Poincaré conclut :

« On voit que la difficulté n'est pas particulière à la théorie de Lorentz et qu'on aura beaucoup de peine à expliquer l'entraînement partiel des ondes sans violer le principe de l'égalité de l'action et de la réaction [PRN] »

Il résulte de tout ce qui précède qu'aucune théorie ne peut satisfaire à la fois aux trois conditions énoncées [...]. Nous ne pourrions par conséquent espérer d'échapper à cette difficulté qu'en modifiant profondément les idées généralement admises [...]. Il faut donc renoncer [alors en 1895] à développer une théorie parfaitement satisfaisante et s'en tenir provisoirement à la moins défectueuse de toutes qui paraît être celle de Lorentz : [1° > 3° ; conviction dans le PMR en électrodynamique suite à Fresnel]

et après avoir renouvelé sa remarque de 1889 sur le PMR, il annonce :

« [...] l'impossibilité de mettre en évidence un mouvement relatif de la matière par rapport à l'éther [PMR] ; et l'égalité qui a sans doute lieu entre l'action et la réaction [PRN] sans tenir compte de l'action de la matière sur l'éther, sont deux faits dont la connexité semble évidente. Peut-être les deux lacunes seront-elles comblées en même temps » [1° = 3° ; les principes vont de pair] [rappel on est en 1895 sur la base de la théorie de Lorentz de 1892].

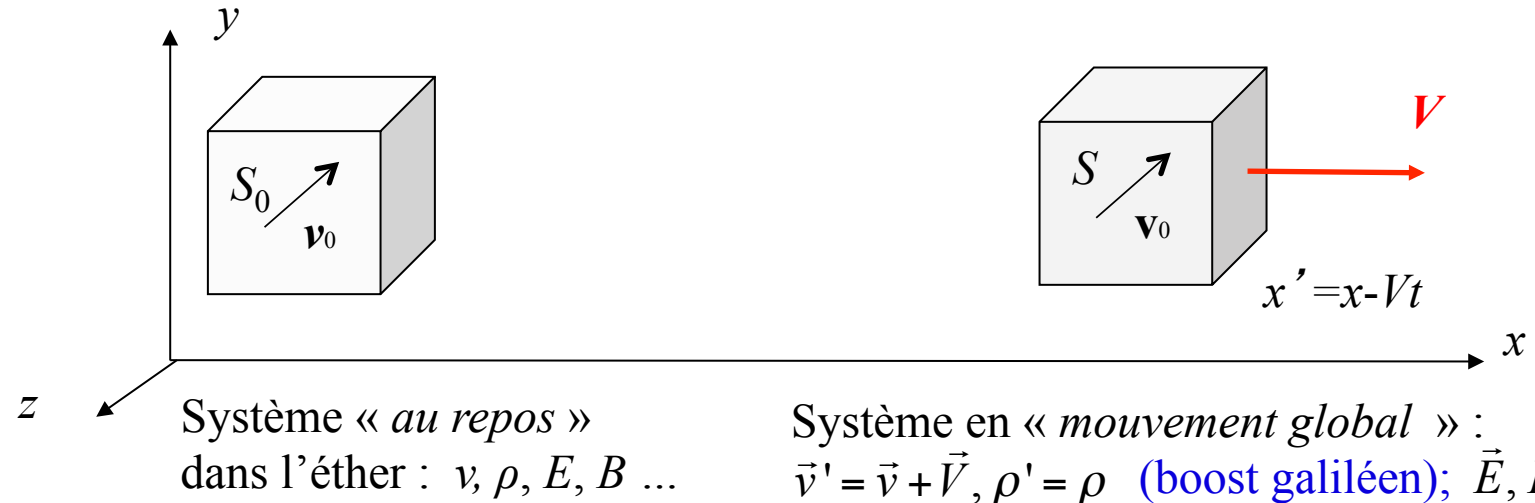
Remarque : Poincaré est le seul scientifique à l'époque pour qui la non validité des principes de la mécanique newtonienne dans le domaine de l'électrodynamique pose un problème fondamental. Ce n'est alors ni un problème pour Lorentz, ni pour Langevin (qui comptent sur l'éther alors que pour Poincaré, l'éther ne peut en aucun cas être une solution aux problèmes ...).

Langevin (même en 1904 dans sa conférence de Saint-Louis, « La physique des électrons ») :

« L'égalité de l'action et de la réaction n'a, d'ailleurs, jamais été démontrée expérimentalement dans des cas semblables [l'électrodynamique], et il n'y a ici aucune difficulté si l'on ne tient pas à étendre ce principe au delà des faits qui l'ont suggéré [la mécanique newtonienne] ».

Un fossé sépare Poincaré des physiciens : Principes (Poincaré) vs éther (physiciens)

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



Lorentz cherche un changement de variables x', y', z', t', E', B' afin de résoudre les **équations de Maxwell** pour le système S en faisant en sorte que dans les nouvelles variables, elles ressemblent si possible à celles pour S_0 , **ce qui expliquerait l'impossibilité de détecter le mouvement « absolu » de la Terre par rapport à l'éther par des expériences optiques**, et plus généralement électromagnétiques, **au premier ordre en V/c** . Il trouve :

$$\begin{aligned} x' &= x - Vt \\ t' &= t - Vx/c^2 \end{aligned} \quad \begin{aligned} &t' \text{ temps local} \\ &\text{(variable fictive pour Lorentz)} \end{aligned} \quad \begin{aligned} \vec{E}' &= \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B} \\ \vec{B}' &= \vec{B} - \vec{V} \wedge \vec{E} / c^2 \end{aligned}$$

conduit à :

$$\begin{aligned} \omega' &= \omega - \vec{k} \cdot \vec{V}, \quad \vec{k}' = \vec{k} - \omega \vec{V} / c^2 \quad \text{effet Doppler et aberration} \\ v' &= v - V \left(1 - v^2 / c^2 \right) \quad \text{formule de Fresnel pour } v' = c/n \end{aligned}$$

Lorentz (1915), rétrospectivement : « simples **grandeurs auxiliaires** dont l'introduction n'est **qu'un artifice mathématique** [...] la variable t' ne pouvait être appelée le temps dans le même sens que la variable t ».

Poincaré, *Électricité et Optique*, 2^{de} édition
(cours 1899, déposé le 14 décembre 1900 à l'académie, date de publication 1901)

À partir de l'invariance des équations de l'électromagnétisme au premier ordre en V/c , Poincaré :

- démontre le « **Théorème** » selon lequel :

« *Le mouvement de la Terre n'affecte pas les phénomènes optiques si les termes en carré de l'aberration $[V^2/c^2]$ sont négligés* »

- écrit les transformations des densités de charge, de courant et de force

$$\rho' = \rho - \vec{V} \cdot \vec{j} / c^2, \quad \vec{j}' = \vec{j} - \rho \vec{V}, \quad \vec{f}' = \vec{f} - (\vec{j} \cdot \vec{E}) \vec{V} / c^2$$

Puissance J fournie aux charges
terme supplémentaire : $J\vec{V}/c^2$ force de Liénard », *Éclairage électrique*, 1898.

« M. Lorentz dans son mémoire de 1895 arrive au contraire [...] à dire que cette force complémentaire [de Liénard] n'existe pas. Nous avons vu pourtant que l'analyse qui précède nous l'a montrée assez facilement ».

Rem : à propos de la contraction de Lorentz-FitzGerald pour interpréter le résultat négatif de l'expérience de Michelson :

« Cette étrange propriété semblerait un véritable « *coup de pouce* » donné par la nature pour éviter que le mouvement absolu de la terre puisse être révélé par les phénomènes optiques. Cela ne saurait me satisfaire et je crois devoir dire ici **mon sentiment** : je regarde comme **très probable que les phénomènes optiques ne dépendent que des mouvements relatifs des corps matériels en présence**, sources lumineuses ou appareils optiques et cela non pas aux quantités près de l'ordre du carré ou du cube de l'aberration, mais **rigoureusement**. À mesure que les expériences deviendront plus exactes, **ce principe** sera vérifié avec plus de précision ».

(ce « **principe** » qui **généralise le « Théorème »** sera le « **postulat de relativité** » de 1905)

Invitation de H. Kammerlingh Onnes pour le **Jubilé pour Lorentz**. Poincaré en septembre 1900 : « Je ne demande pas mieux que de collaborer au Jubelschrift [...] Mais je vous demanderai un peu de temps avant de vous donner le titre de ce travail ; cela demande quelque réflexion ». Envoi de l'article en novembre, 27 pages.

Introduction : « Je pourrais dire que les pages qui vont suivre sont plutôt de nature à **atténuer** qu'à aggraver **cette objection** (violation du PRN) »

§1. « Rappelons d'abord rapidement le calcul par lequel on établit que **dans la théorie de Lorentz le principe de l'égalité de l'action et de la réaction [PRN] n'est plus vrai, du moins quand on veut l'appliquer à la matière seule** »

Poincaré part de l'expression de la force de Lorentz
$$\vec{F} = \int (\rho \vec{E} + \vec{j} \wedge \vec{B}) d\tau$$

Utilisant les quatre éqs. de Maxwell, les théorèmes usuels d'intégration pour passer d'intégrales volumiques à des intégrales de surface (obtenant au passage les termes de **pressions de Maxwell** σ), puis étendant le domaine d'intégration à l'infini (ce qui fait disparaître ces termes de surface), Poincaré obtient l'expression de la force subie par les charges à l'intérieur du volume (non nulle en régime variable) :

$$\vec{F} = -\frac{d}{dt} \int \varepsilon_0 (\vec{E} \wedge \vec{B}) d\tau$$

Par analogie avec $\vec{F} = d\vec{p}/dt$, Poincaré introduit $\vec{p}_{em} = \varepsilon_0 (\vec{E} \wedge \vec{B})$ qui entre dans le bilan : $M\vec{v} + \varepsilon_0 (\vec{E} \wedge \vec{B}) = \vec{C}$

Il remarque aussitôt que ce terme s'identifie « **au vecteur radial de Poynting** » [au facteur c^2 près] **traduisant la propagation de l'énergie électromagnétique**, et qui intervient dans les bilans au côté de l'énergie « créée à l'intérieur du volume par transformation d'énergie d'autres espèces ».

Poincaré écrit 6 pages plus loin : « Dans l'analyse qui précède nous avons fait jouer un rôle **à ce que nous avons appelé la quantité de mouvement de l'énergie électromagnétique** [aucunement mentionnée avant!] ».

Poincaré introduit une **analogie** pour la discussion qu'il mène ensuite sur l'équation (mvt du centre de masse) :

$$\frac{d}{dt} M\vec{R} = \vec{C} - \int \vec{r} (\vec{j} \cdot \vec{E}) / c^2 d\tau \quad [3]$$

« Nous **pouvons regarder l'énergie électromagnétique** comme un **fluide fictif** dont la densité est $[J/c^2, J \text{ énergie transportée}]$ qui se déplace dans l'espace conformément aux lois de Poynting. Seulement il faut **admettre que ce fluide n'est pas indestructible** et que dans l'élément de volume $d\tau$ il s'en détruit pendant l'unité de temps une quantité $\left[\left(\int \vec{j} \cdot \vec{E} d\tau \right) / c^2 \right]$ (ou qu'il s'en crée une quantité égale et de signe contraire, si cette expression est négative) ; c'est **ce qui empêche que nous puissions assimiler tout a fait dans nos raisonnements notre fluide fictif a un fluide réel** ».

« Dans la Mécanique ordinaire, de la constance de la quantité de mouvement on conclut que le mouvement du centre de gravité est rectiligne et uniforme. Mais ici **nous n'avons pas le droit** de conclure que le centre de gravité du système formé par la matière et notre fluide fictif a un mouvement rectiligne et uniforme ; et cela **parce que ce fluide n'est pas indestructible** ».

« Voici comment **on pourrait** énoncer l'équation [3] **dans le langage ordinaire** »

« S'il n'y a **nulle part création ou destruction** d'énergie électromagnétique [...] alors le centre de gravité du système formé par la matière et par l'énergie électromagnétique (regardée comme un fluide fictif) a un **mouvement rectiligne et uniforme** ».

Dans le cas contraire, Poincaré nous dit qu'il faut considérer que le fluide peut être **créé ou disparaître sur place et qu'il** « n'y a dans cette **convention** rien qui doive nous choquer puisqu'il ne s'agit que d'une **fiction mathématique** » et qu'ainsi : « **Si l'on adopte cette convention, le mouvement du centre de gravité du système [matière + rayonnement] est encore rectiligne et uniforme** ».

« L'énergie électromagnétique se comportant donc du point de vue qui nous occupe comme un **fluide doué d'inertie**, on doit conclure que si un **appareil** quelconque après avoir produit de l'énergie électromagnétique, l'envoie par rayonnement dans une certaine direction, cet appareil devra **reculer** comme recule un canon qui a lancé un projectile ».

§3. Pour Poincaré, le principe de réaction newtonien (PRN) « s'impose à notre esprit » car « [Il] nous apparaît ... comme une **conséquence de celui de l'énergie et de celui du mouvement relatif [PMR]** ... », mais constate : « *Il semble que le principe de mouvement relatif [PMR], qui ne s'imposait pas a priori, est vérifié a posteriori et que le principe de réaction [PRN] devrait s'en suivre ; et cependant il n'en est pas ainsi, comment cela se fait-il?* »

Il avance **4 raisons** qui permettent à la théorie de Lorentz de satisfaire le PMR :

1. Cette compensation n'a lieu qu'en **négligeant v^2** , à moins de faire une certaine hypothèse complémentaire que je ne discuterai pas pour le moment.

2. Pour que la compensation se fasse, il faut **rapporter les phénomènes**, non pas au temps vrai t , **mais à un certain temps local t'** défini de la façon suivante.

Je suppose que des observateurs placés en différents points, règlent leurs montres à l'aide de signaux lumineux ; qu'ils cherchent à corriger ces signaux du temps de la transmission, mais qu'ignorant le mouvement de translation dont ils sont animés et croyant par conséquent que les signaux se transmettent également vite dans les deux sens, ils se bornent à croiser les observations, en envoyant un signal de A en B , puis un autre de B en A . Le temps local t' est le temps marqué par les montres ainsi réglées.

Si alors c est la vitesse de la lumière, et V la translation de la Terre que je suppose parallèle à l'axe des x positifs, on aura :

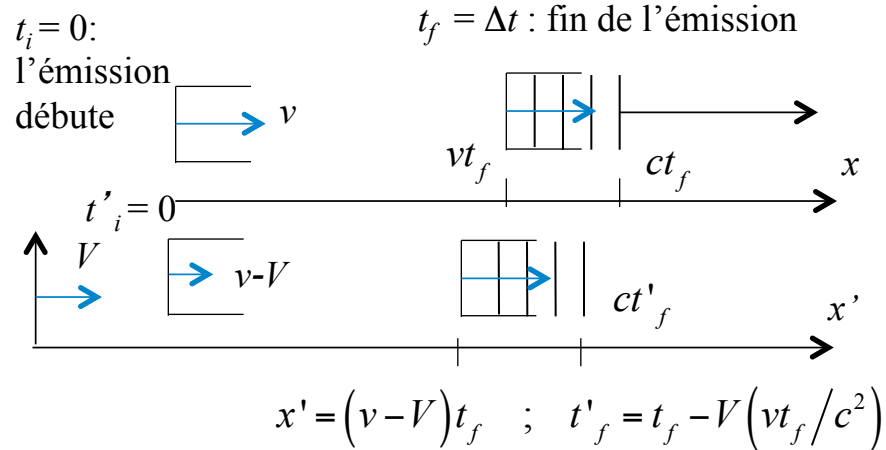
$$t' = t - Vx/c^2$$

(Réception du signal par B à $t' = l/c$, en $x = ct = l + Vt = l + Vx/c$ dans l'éther. En éliminant l on obtient le temps local t')

3. L'énergie apparente se propage dans le mouvement relatif suivant les mêmes lois que l'énergie réelle dans le mouvement absolu, mais **l'énergie apparente n'est pas exactement égale à l'énergie réelle correspondante** [ce que va montrer Poincaré sur l'exemple de l'énergie du rayonnement] ».

4. Dans le mouvement relatif, les corps producteurs d'énergie électromagnétique sont soumis à une **force apparente complémentaire qui n'existe pas dans le mouvement absolu** [la force de Liénard, qui apparaît dans la transformation de la force volumique de Lorentz] ».

Poincaré applique les changements de variables de Lorentz $x' = x - Vt, t' = t - Vx/c^2$, $\vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}$, $\vec{B}' = \vec{B} - \vec{V} \wedge \vec{E} / c^2$ à un **oscillateur hertzien** qui émet un **train d'onde plan** dans une direction donnée.



L Longueur *réelle* du train d'onde, L' longueur *apparente*

$$L' = L(1 + V/c)$$

Énergie *réelle* $J\Delta t$

(**énergie comme fréquence!**)

Énergie *apparente* $J' \Delta t \quad J' = J(1 - V/c)$

Quantité de mouvement électromagnétique au premier ordre :

$$p' = J' \Delta t / c = p - VJ\Delta t / c \quad [= p - VE/c]$$

Recul du « canon »
(masse m constante)

réel: $\Delta(mv) = m\Delta v = -J\Delta t / c$

apparent : $\Delta(mv') = \Delta(m(v - V)) = \Delta mv = -J' \Delta t / c = -J\Delta t / c + \left(\frac{JV}{c^2} \right) \Delta t$

force de Liénard

« Si donc, dans la théorie de Lorentz, le recul peut avoir lieu sans violer le principe de l'énergie, c'est que l'énergie apparente pour un observateur entraîné avec les axes mobiles n'est pas égale à l'énergie réelle. Supposons donc que notre excitateur subisse un mouvement de recul et que l'observateur soit entraîné dans ce mouvement ($v' = v < 0$), l'excitateur paraîtra immobile à cet observateur et il lui semblera qu'il rayonne autant d'énergie qu'au repos. Mais en réalité il en rayonnera moins et c'est ce qui **compense le travail de recul** »

« L'existence de la force complémentaire apparente est donc une conséquence nécessaire du phénomène de recul »

« Ainsi dans la théorie de Lorentz le **principe de réaction [PRN]** ne doit pas s'appliquer à la matière seule [PRE] ; le **principe de mouvement relatif [PMR]** ne doit pas non plus s'appliquer à la matière seule [force de Liénard]. Ce qu'il importe de remarquer c'est qu'il y a entre les deux faits **une connexion intime et nécessaire** »

La contribution de Poincaré vue par ses contemporains et par lui-même :

Abraham 1902 (puis 1903) : « Le rapport de la théorie de Lorentz avec le troisième axiome de Newton [PRN] a été discutée de manière particulièrement détaillée par Monsieur Henri Poincaré ; il a souligné que la loi de conservation de la quantité de mouvement conserve sa validité si une certaine quantité de mouvement est attribuée au champ électromagnétique ».

Langevin 1904 : « Si l'on veut néanmoins réaliser cette extension quelque peu arbitraire[du PRN], on est conduit à ne pas appliquer le principe à la matière seule, et à supposer à l'éther [terme introduit par Langevin ; rayonnement pour Poincaré] une quantité de mouvement, qui serait celle du système matériel auquel on l'assimile. M. Poincaré a montré que cette quantité de mouvement électromagnétique doit être proportionnelle en chaque point, en grandeur et en direction, au vecteur de Poynting, qui permet en même temps de définir l'énergie transmise à travers le milieu ».

1913 (SFP) : « Mais on peut aussi, comme l'a bien montré Henri Poincaré, sauvegarder les principes [...] par une généralisation convenable des notions qu'ils impliquent [...] Nous pouvons retrouver la conservation en considérant le rayonnement [il n'est plus question d'éther!] comme un véhicule de quantité de mouvement ».

Poincaré 1908 : « J'ai eu à examiner diverses conséquences de la théorie de Lorentz. J'ai montré qu'elle était incompatible avec le principe de l'égalité de l'action et de la réaction [PRN] et comment il conviendrait de modifier ce principe [PRE] pour le mettre d'accord avec cette théorie [en attribuant une quantité de mouvement à l'énergie électromagnétique]. Ce résultat a servi de point de départ à Abraham pour ce calcul par lequel il a démontré que la masse des électrons est d'origine purement électromagnétique [...].

Wien 1915 : « Un article qu'il publie en 1900 dans le Jubilé de Lorentz est d'une grande importance pour la physique théorique. Il y a introduit la quantité de mouvement électromagnétique, qui a permis d'éliminer la contradiction vis-à-vis du principe de l'action et de la réaction, une théorie devenue très importante pour le développement ultérieur de l'électrodynamique ».

H. A. Lorentz, *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, 1904

Nouveau changement de variables (à tout ordre) :

$$\begin{aligned}x' &= \gamma l(x) \\t' &= \frac{l}{\gamma} t - \gamma l \frac{v}{c^2} (x) \\(x) &= (x - vt) \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}\end{aligned}$$

« Lorentz a cherché à compléter et a modifier son hypothèse de façon à la mettre en concordance avec le postulat de l'impossibilité complète de la détermination du mouvement absolu », Poincaré *CRAS*, 1905.

Nouvelle expression du temps local t' .

Mais seulement 3 équations de Maxwell sur 4 invariantes avec ces transformations. Pourquoi?

H. Poincaré, *Sur la dynamique de l'électron*, *Comptes rendus des séances de l'académie des sciences*, 5 juin 1905

Poincaré a vu que le **boost galiléen initial** de Lorentz ($\vec{v}' = \vec{v} + \vec{V}$, $\rho' = \rho$) ne peut pas être compensé par le changement de variables. Il faut le remplacer par un « **boost Lorentzien** » : utiliser une (nouvelle) cinématique compatible avec ces transformations.

« Il semble que cette impossibilité de démontrer le mouvement absolu soit une loi générale de la nature ».

$$\begin{aligned}x' &= l\gamma(x + \varepsilon t) \\t' &= l\gamma(t + \varepsilon x) \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}\end{aligned}$$

$c=1$

ε vitesse

l = facteur de dilatation

(sous-)groupe si $l(\varepsilon) = 1$

« *Transformations de Lorentz* »

(actives)

« Il semble que cette impossibilité de mettre en évidence expérimentalement le mouvement absolu de la Terre soit une loi générale de la Nature ; nous sommes naturellement portés à admettre cette loi, que nous appellerons **Postulat de Relativité [PR]** et à l'admettre **sans restriction** ».

Poincaré fonde de nouveau son approche de la dynamique de l'électron sur la **compatibilité de principes** : Principe de moindre action [PMA] et le **Postulat de relativité [PR]** :

- Action électromagnétique décrivant un modèle d'électron étendu (§2)
- « Voyons si le principe de moindre action nous donne la raison du succès des transformations de Lorentz » (§3)

$$S = \int L . dt = S' = \int L' . dt', \quad L = l L' / \gamma, \quad \vec{p} = \frac{4}{3} \gamma l \vec{v} L', \quad l = 1 \quad \rightarrow \quad L = L' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

(Invariance de l'action par le **groupe de transformation de Lorentz** : **PMA et PR**, §3 et 6)

Les équations de Hamilton (conséquence du PMA en mécanique) reliant énergie, quantité de mouvement et lagrangien ne sont vérifiées qu'avec l'**hypothèse de Langevin** [éther incompressible] $l = \gamma^{-1/3}$ [« incapable de s'accorder avec l'impossibilité d'une expérience montrant le mouvement absolu », CRAS] d'un électron conservant son volume ; **nouveau conflit de la théorie de Lorentz avec la mécanique**.

- Introduction d'un terme de pression (non électromagnétique) dans le lagrangien [**modification du modèle d'électron de Lorentz**] pour assurer la **compatibilité entre PMA et PMR** (stabilité de l'électron relativiste).

Quelle influence des travaux de Poincaré de 1900 sur Einstein?

« 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.

Cette question se pose donc! (A. Miller, O. Darrigol, ...)

COURS DE PHYSIQUE MATHÉMATIQUE



ÉLECTRICITÉ ET OPTIQUE

LA LUMIÈRE

DONAZIONE
PROF. G. JUNG

ET LES

THÉORIES ÉLECTRODYNAMIQUES

LEÇONS PROFESSÉES A LA SORBONNE

EN 1888, 1890 ET 1899

PAR
H. POINCARÉ
MEMBRE DE L'INSTITUT

DEUXIÈME ÉDITION, REVUE ET COMPLÉTÉE

JULES BLONDIN
AGRÉGÉ DE L'UNIVERSITÉ

PAR
EUGÈNE NÉCULGÉA
LICENCIÉ ÈS SCIENCES

PARIS

GEORGES CARRÉ ET C. NAUD, ÉDITEURS

3, RUE SACINE, 3

1901

Donation de Giuseppe Jung (oncle de Michele Besso, mathématicien au Politecnico) :

2500 preprints mathématiques, les 12 premières publications d'Albert Einstein (1901-1906), 1 seul article de Poincaré

500 ouvrages, seulement une vingtaine en physique dont plusieurs entre 1899-1901 (M. Besso à Milan). Einstein travaille sur les oscillations hertziennes pour Besso (lettre à Mileva, 09/1900) et incite Besso à faire une thèse. Bibliographie de Besso retrouvée chez son oncle?

Righi, *L'ottica delle oscillazioni elettriche*, 1897

Colson, *Traité élémentaire d'électricité*, 1900 (don des éditeurs).

Poincaré, *Théorie du potentiel newtonien*, 1899

Poincaré, *Electricité et optique*, 1901 (don des éditeurs).

Poincaré, *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*, 1899) (don des éditeurs).

Broca, *La télégraphie sans fils*, 1899.

Murani, *Trattato elementare di fisica*, 1901.

Lettre d'Einstein à Grossmann 09/1901, à Mileva 12/1901+ souvenirs : conférence de Kyoto. Expérience interférentielle, thermopiles.

Mieux que plaques photographiques?

Hypothèse (raisonable) :

Michele Besso ou/et Albert Einstein ont lu *Électricité et Optique* en 1901.

48
19012

III a 165

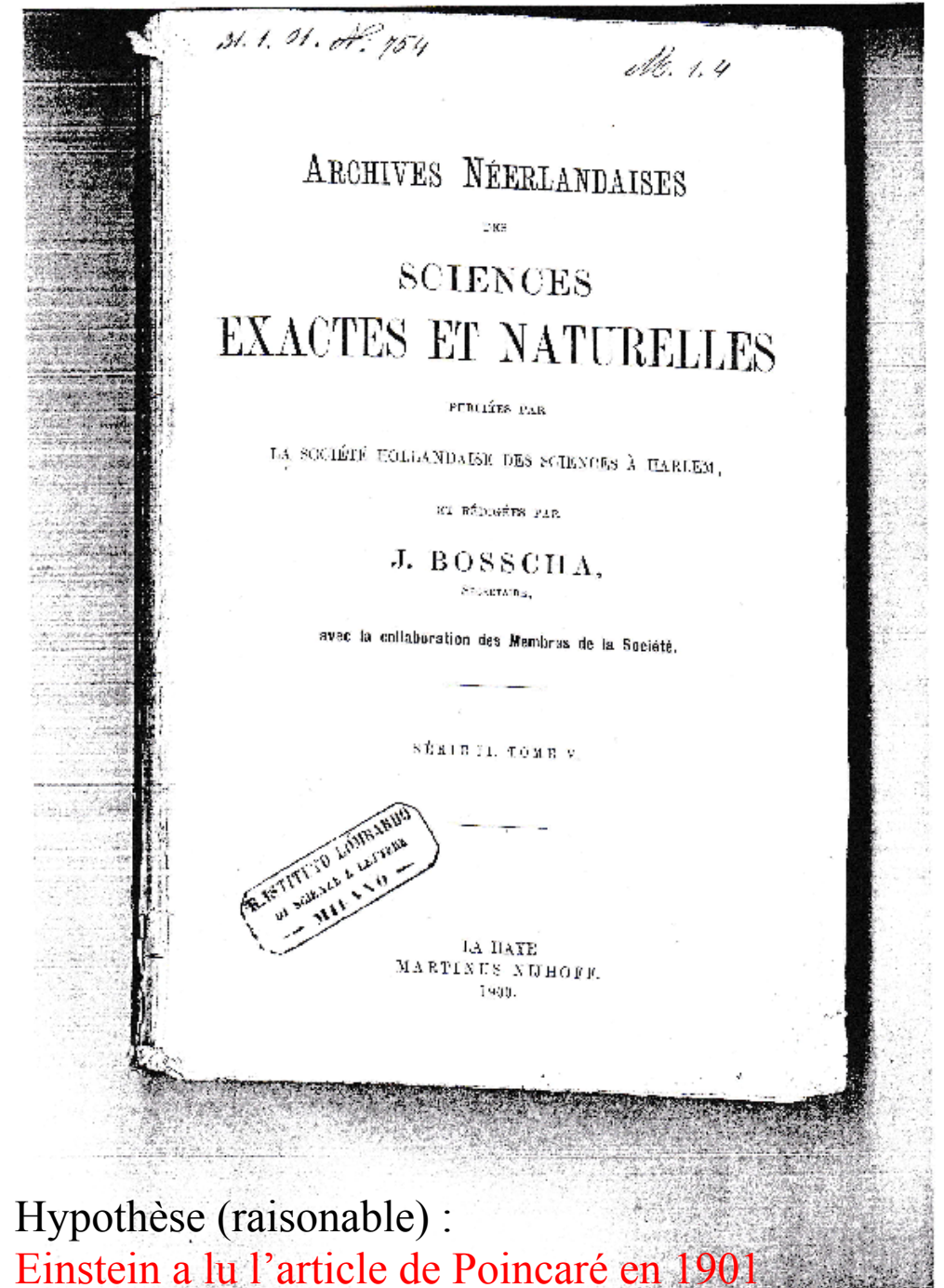
1814

Festschrift pour Lorentz, 11 décembre 1900,

Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles, vol. 5 (1900)

(reçu à l' Istituto Lombardo le 31 janvier 1901). 70 articles dont :

- W. Kaufmann**, Ueber die Schwingungsamplitude der Elektronen, 148-151.
- L. Boltzmann**, Notiz über die Formel für den Druck der Gase, 76-77.
- M. Planck**, ueber die von einem elliptisch schwingenden Ion emittirte und absorbirte Energie, 164-174. (Lettre à Mileva du 10/04/1901).
- A. Righi**, Sur les ondes électromagnétiques d' un ion vibrant, 348-355.
- J. Farkas**, Allgemeine Prinzipien für die Mechanik des Aethers, 56-75.
- W. Wien**, Ueber die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik, 96-107.
- H. Poincaré**, La théorie de Lorentz et le principe de réaction, 252-278
cité en 1906 par Einstein : « Bien que les simples considérations formelles qui doivent être menées pour prouver cette affirmation [nécessité de $m = E/c^2$ pour la conservation du mouvement du centre de masse] soient pour l'essentiel déjà contenues dans un article de H. Poincaré [référence à HP 1900], par souci de clarté je ne me baserai pas sur ce travail ».
- D. A. Goldhammer**, Ueber den Druck der Lichtstrahlen, 467-483.
- E. Cohn**, Ueber die Gleichungen der Elektrodynamik für Bewegter Körper, 516-523
- E. Wiechert**, Elektrodynamische Elementargesetze, 549-573.
- J. D. van der Waals Jr**, La propagation libre de la radiation est-elle réversible ?, 587-594.
- G. H. Bryan**, Energy accelerations. A study in energy partition and irreversibility, 279-295.
- M. Reinganum**, Molekuläre Anziehung in schwach comprimierten Gasen, 574-582.
(réorientation de la thèse d'Einstein, lettre à Grossman 14/04/1901, Mileva 15/04/1901),
élargissement des fluides aux gaz faiblement comprimés, lettre à H. K. O. 12/04/11, patron de M. Reinganum, pour un poste d'assistant)



Hypothèse (raisonable) :

Einstein a lu l'article de Poincaré en 1901

La Science et l'Hypothèse

PAR

H. POINCARÉ

Membre de l'Institut



PARIS

ERNEST FLAMMARION, ÉDITEUR

26, RUE RACINE, 26

Droits de traduction et de reproduction réservés pour tous les pays,
y compris la Suède et la Norvège.

1° Il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs ; cependant on énonce le plus souvent les faits mécaniques comme s'il y avait un espace absolu auquel on pourrait les rapporter ;

2° Il n'y a pas de temps absolu ; dire que deux durées sont égales, c'est une assertion qui n'a par elle-même aucun sens et qui n'en peut acquérir un que par convention ;

3° Non seulement nous n'avons pas l'intuition directe de l'égalité de deux durées, mais nous n'avons même pas celle de la simultanéité de deux événements qui se produisent sur des théâtres différents ; c'est ce que j'ai expliqué dans un article intitulé la *Mesure du temps* [1898]

$$t' = t - Vx/c^2$$

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

Lecture assidue, pendant plusieurs semaines, d'Einstein (académie Olympia) : cf. préface de Maurice Solovine dans l'édition de ses lettres à Einstein (1956).

(Renvoie un lecteur averti à Poincaré 1900)

"When Einstein was asked in 1955 whether Poincaré had had any influence on his development of special relativity, he answered :

“Concerning myself, I knew only Lorentz’s important work of 1895, but not Lorentz’s later work [1904], nor the consecutive investigations by Poincaré.” "

Compatible avec la connaissance des travaux de Poincaré de 1900 et 1901, qui sont le lien entre théorie de Lorentz et relativité!!

Un dernier point : **quanta et relativité ...**

Einstein « *appears to have had very clear and profound ideas as to what Nature was « really like » at levels not ready perceivable by other physicists [...]. To me, it is virtually inconceivable that he would have put forward two papers [quanta, relativity] in the same year which depended upon hypothetical views of Nature that he felt were in contradiction with each other.* Roger Penrose’s foreword of John Stachel’s book *Einstein’s miraculous year* (2005).

Poincaré (transformation inverse de $E; \nu^{-1}$)	-	Planck ($\varepsilon = h\nu$)
11 décembre 1900	-	15 décembre 1900 ; publication au même temps que le premier article d’Einstein (soumis le 13 décembre!) en avril 1901.

Lecture par Einstein en avril 1901 de ces deux articles

Premières réflexions d’Einstein sur les quanta datant d’avril-mai 1901 (Einstein, Renn, ...)

Quanta (mars 1905), Electrodynamique des corps en mouvement (juin 1905)

Modèle naïf de quanta : morceau d’onde plane d’énergie $h\nu$ (Einstein 1909)