

# POINCARÉ ET LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

Thibault Damour Institut des Hautes Etudes Scientifiques

Conférence « Henri Poincaré », Académie des Sciences, 6 novembre 2012



Thibault Damour, *Poincaré et la Théorie de la Relativité*  
Académie des Sciences - 6 novembre 2012



# Poincaré et la théorie de Lorentz (1)

**Cours donné à la Sorbonne** : en 1887-1888, 1890 et 1899

« *Electricité et Optique. La lumière et les Théories Electrodynamiques* »

Rencontre de P. avec les théories de Maxwell, Hertz, ..., et **Lorentz**

P. juge que la théorie électromagnétique de Lorentz est la plus satisfaisante

P. a trouvé chez Lorentz (notamment Lorentz 1892 et 1895) :

- Le problème posé par diverses expériences, et notamment celles de Michelson (1881) et Michelson-Morley (1887) : **pourquoi ne peut-on pas détecter le mouvement « absolu » de la Terre ?**
- Une première version des « **transformations de Lorentz** » entre un référentiel « au repos » (par rapport à l'« éther ») et le référentiel en mouvement (« Terre »), contenant notamment le remplacement du temps (absolu)  $t$  par le « **temps local** »

$$t' = t - vX/c^2 \text{ où } X = x - vt$$

intervenant dans une preuve qu'aucune expérience électromagnétique ne peut détecter un mouvement commun par rapport à l'éther **au premier ordre en  $v/c$**



## Poincaré et la théorie de Lorentz (2)

- L'hypothèse de la « contraction de Lorentz-Fitzgerald » pour expliquer, **au deuxième ordre en  $v/c$**  le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley.
- **1899** [Publié en 1901] leçons à la Sorbonne : P. dit qu'il n'est pas satisfait par les « **coups de pouce** » successifs (au premier ordre en  $v/c$ , puis au deuxième ordre) inventés pour expliquer l'impossibilité de détecter le mouvement absolu de la Terre. Il regarde comme « très probable » que les phénomènes optiques dépendent seulement du mouvement relatif des corps en présence, et ce de façon rigoureuse.
- **1900** P. : Rapport présenté au Congrès International de Physique (Paris) : il affirme que : « *tout nous porte à penser que cette explication [compensation des effets en  $(v/c)$  puis en  $(v/c)^2$ ] vaudra également pour les termes d'ordre supérieurs, et que la destruction mutuelle de ces termes sera rigoureuse et absolue.* » {repris dans Science et Hypothèse, 1902}.



## Poincaré et la théorie de Lorentz (3)

- 1900 P. écrit un article pour le (demi) jubilé de la Thèse de Lorentz. P. y donne [comme l'ont souligné H. Thirring, Handbuch der Physik t. 12, p. 270 (1927) ; G. Petiau (?) vol. IX, Œuvres de Poincaré, p. 698 (1954), et O. Darrigol, SHPMP 26, 1 (1995)] une **interprétation opérationnelle du temps local**  $t' = t - vX/c^2 + O(v^2)$ .

Poincaré fait remarquer que si des observateurs en mouvement (commun) décidaient de synchroniser leurs montres par échange croisé de signaux optiques, en admettant [à tort] que ces signaux se propagent à la même vitesse dans les deux sens, alors les montres ainsi réglées marqueraient le temps local  $t'$  de Lorentz **au premier ordre en  $v/c$** .

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  $V = \frac{1}{\sqrt{K_0}}$  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 :

$$t' = t - \frac{vx}{V^2}.$$



## La percée de Lorentz : mai 1904 (1)

H.A. Lorentz : « Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light », Proceedings of the Academy of Sciences of Amsterdam, 27 mai 1904

- Reconnaît que l'objection de Poincaré (invention d'hypothèses particulières pour expliquer chaque résultat expérimental négatif) suggère :  
« *It would be more satisfactory if it were possible to show by means of certain fundamental assumptions, and without neglecting terms of one order of magnitude or another, that **many** electromagnetic actions are entirely independent of the motion of the system* ».

- Il introduit « le changement de variables »

$$(\gamma \equiv 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} ; \bar{x} \equiv x - vt)$$

$$x' = \ell\gamma\bar{x}, y' = \ell y, z' = \ell z, t' = \ell\left[\frac{t}{\gamma} - \gamma v \frac{\bar{x}}{c^2}\right]$$

(  $\equiv$  « transformation de Lorentz » plus dilatations)



## La percée de Lorentz : mai 1904 (2)

- Il définit de nouveaux champs électriques et magnétiques  $\mathbf{D}'$ ,  $\mathbf{H}'$ , et une nouvelle densité de charge  $\rho'$  et un courant de convection  $\rho'\mathbf{u}' (= \mathbf{J}')$ , et montre que les équations de Maxwell-Lorentz, avec sources, sont les mêmes, à part

$$\operatorname{div}' \mathbf{D}' = \rho' \left( 1 - \frac{v u'_x}{c^2} \right)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div}' \mathbf{D}' &= \left( 1 - \frac{v u'_x}{c^2} \right) \rho', \operatorname{div}' \mathbf{H}' = 0, \\ \operatorname{curl}' \mathbf{H}' &= \frac{1}{c} \left( \frac{\partial \mathbf{D}'}{\partial t'} + \rho' \mathbf{u}' \right), \\ \operatorname{curl}' \mathbf{D}' &= - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}'}{\partial t'}, \end{aligned} \right\}$$

- Il postule :

1 : Que les « électrons » (sphériques au repos) sont contractés de  $(\gamma \ell, \ell, \ell)$  : « flattened ellipsoids »,

2 : que toutes les forces entre particules (chargées ou pas) sont modifiées (par  $v$ ) comme les forces électriques et

3 : que l'inertie des électrons est entièrement due à l'impulsion contenue dans son champ électromagnétique.



## La percée de Lorentz : mai 1904 (3)

- Il argue, à partir de questions de dynamique de l'électron, qu'il faut prendre  $\ell(v) = 1$  .
- Alors il prouve un théorème de « corresponding states » :  
*« If, in the system without translation, there is a state of motion in which, at a definite place, the components of **P**, [electric dipole moment], **D**, and **H** are certain functions of the time, then the same system, after it has been put in motion (and thereby deformed) can be the seat of a state of motion in which, at the corresponding place [**x'**], the components of **P'**, **D'** and **H'** are the same functions of the local time [**t'**]. »*  
et donc qu'il sera (en particulier) impossible de détecter l'influence du mouvement de la Terre sur toute expérience optique (faite avec une source terrestre) où l'on observe « la distribution géométrique de lumière et d'ombre ».
- Il prouve aussi (sous une forme différente) que l'équation du mouvement d'un électron, est 
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \mathbf{F}$$



# « Le principe de (la) relativité » de Poincaré septembre 1904 (1)

Septembre 1904 [après réception et lecture de l'article de Lorentz 1904] Poincaré présente au Congrès International des Arts et de la Science de Saint Louis (USA) un rapport {repris dans la Valeur de la Science 1905} sur l'état actuel de la physique mathématique. Il dit : « *il y a des indices d'une crise sérieuse.* » Il voit l'évolution de la physique mathématique à l'aune d'une « physique des principes ». Il donne une liste des « principes » de la physique :

- « le principe de conservation de l'énergie, ou principe de Mayer, [...] »
  - Le principe de Carnot, ou principe de dégradation de l'énergie ;
  - Le principe de Newton, ou principe de l'égalité de l'action et de la réaction ;
  - **Le principe de la relativité**, d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement de translation uniforme ; de sorte que nous n'avons, et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes, oui ou non, emportés dans un pareil mouvement ;
  - Le principe de la conservation de la masse, ou principe de Lavoisier ;
- j'ajouterai le principe de moindre action ».



## « Le principe de (la) relativité » de Poincaré septembre 1904 (2)

- Poincaré y rappelle aussi son interprétation opérationnelle du temps local de Lorentz, par échange croisé de signaux optiques. Il précise que la durée de transmission entre deux stations A et B *« ne sera pas la même dans les deux sens »* si les stations sont en mouvement [absolu] et donc que *« Les montres réglées de la sorte ne marqueront donc pas le temps vrai. »* *« Peu importe, puisque nous n'avons aucun moyen de nous en apercevoir. »* Mais il ajoute : *« Qu'arriverait-il si on pouvait communiquer par des signaux qui ne seraient plus lumineux, et dont la vitesse de propagation différerait de celle de la lumière ? Si après avoir réglé les montres par le procédé optique, on voulait vérifier le réglage à l'aide de ces nouveaux signaux, on constaterait des divergences qui mettraient en évidence la translation commune des deux stations. Et de pareils signaux sont-ils inconcevables, si l'on admet avec Laplace que la gravitation universelle se transmet un million de fois plus vite que la lumière ? »*
- Poincaré résume les résultats récents de Lorentz 1904, et commente : *« Il s'agit avant tout d'obtenir une théorie plus satisfaisante de l'électrodynamique des corps en mouvement. [...] Prenons donc la théorie de Lorentz, retournons-la dans tous les sens ; modifions-la peu à peu, et tout s'arrangera peut-être. »*
- Poincaré revient de Saint Louis avec Langevin, et voyage avec lui pendant une semaine.



## La percée de Poincaré : juin-juillet 1905

**5 juin 1905** « Sur la dynamique de l'électron » Note de P. aux C.R Acad. Sci. Paris **140**, 1504-1508 pour prendre date ; suivie d'un article détaillé (fini en juillet 1905) « Sur la dynamique de l'électron » Rend. Circ. Matem. Palermo **21**, 17-176 (1906) reçu le **23 juillet 1905**).

La Note au CRAS est une annonce (assez cryptique) de résultats (sans preuves), où P. résume certains de ses résultats nouveaux [mais omet de mentionner certains des résultats essentiels du long article, notamment sur l'utilisation technique d'un « espace à 4 dimensions » ( $x, y, z, ict$ )]

[[N.B. L'article d'Einstein « Sur l'électrodynamique des corps en mouvements », a été reçu par Annalen der Physik le 30 juin 1905, et sans doute écrit entre la mi-mai et fin juin 1905.]]



ÉLECTRICITÉ. — *Sur la dynamique de l'électron.*

Note de M. H. POINCARÉ.

Il semble au premier abord que l'aberration de la lumière et les phénomènes optiques qui s'y rattachent vont nous fournir un moyen de déterminer le mouvement absolu de la Terre, ou plutôt son mouvement, non par rapport aux autres astres, mais par rapport à l'éther. Il n'en est rien; les expériences où l'on ne tient compte que de la première puissance de l'aberration ont d'abord échoué et l'on en a aisément découvert l'explication; mais Michelson, ayant imaginé une expérience où l'on pouvait mettre en évidence les termes dépendant du carré de l'aberration, ne fut pas plus heureux. Il semble que cette impossibilité de démontrer le mouvement absolu soit une loi générale de la nature.

Une explication a été proposée par Lorentz, qui a introduit l'hypothèse d'une contraction de tous les corps dans le sens du mouvement terrestre; cette contraction rendrait compte de l'expérience de Michelson et de toutes celles qui ont été réalisées jusqu'ici, mais elle laisserait la place à d'autres expériences plus délicates encore, et plus faciles à concevoir qu'à exécuter, qui seraient de nature à mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre. Mais, si l'on regarde l'impossibilité d'une pareille constatation comme hautement probable, il est permis de prévoir que ces expériences, si on parvient jamais à les réaliser, donneront encore un résultat négatif, Lorentz a cherché à compléter et à modifier son hypothèse de façon à la mettre en concordance avec le postulat de l'impossibilité *complète* de la détermination du mouvement absolu. C'est ce qu'il a réussi à faire dans son article intitulé *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light* (*Proceedings* de l'Académie d'Amsterdam, 27 mai 1904).

L'importance de la question m'a déterminé à la reprendre; les résultats que j'ai obtenus sont d'accord sur tous les points importants avec ceux de Lorentz; j'ai été seulement conduit à les modifier et à les compléter dans quelques points de détail.

Le point essentiel, établi par Lorentz, c'est que les équations du champ électromagnétique ne sont pas altérées par une certaine transformation (que j'appellerai du nom de *Lorentz*) et qui est de la forme suivante

$$(1) \quad x' = kl(x + \varepsilon t), \quad y' = ly, \quad z' = lz, \quad t' = kl(t + \varepsilon x),$$

$x, y, z$  sont les coordonnées et  $t$  le temps avant la transformation,  $x', y', z'$  et  $t'$  après la transformation. D'ailleurs  $\varepsilon$  est une constante qui définit la transformation

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

et  $l$  est une fonction quelconque de  $\varepsilon$ . On voit que dans cette transformation l'axe des  $x$  joue un rôle particulier, mais on peut évidemment construire une transformation où ce rôle serait joué par une droite quelconque passant par l'origine. L'ensemble de toutes ces transformations, joint à l'ensemble de toutes les rotations de l'espace, doit former un groupe; mais, pour qu'il en soit ainsi, il faut que  $l = 1$ ; on est donc conduit à supposer  $l = 1$  et c'est là une conséquence que Lorentz avait obtenue par une autre voie.

Soient  $\rho$  la densité électrique de l'électron,  $\xi, \eta, \zeta$  sa vitesse avant la transformation; on aura pour les mêmes quantités  $\rho', \xi', \eta', \zeta'$  après la transformation

$$(2) \quad \rho' = \frac{k}{\beta} \rho(1 + \varepsilon \xi), \quad \rho' \xi' = \frac{k}{\beta} \rho(\xi + \varepsilon), \quad \rho' \eta' = \frac{\rho \eta}{\beta}, \quad \rho' \zeta' = \frac{\rho \zeta}{\beta}.$$

Ces formules diffèrent un peu de celles qui avaient été trouvées par Lorentz.

Mais avec l'hypothèse de Lorentz, l'accord entre les formules ne se fait pas tout seul; on l'obtient, et en même temps une explication possible de la contraction de l'électron, en supposant que *l'électron, déformable et compressible, est soumis à une sorte de pression constante extérieure dont le travail est proportionnel aux variations du volume.*

Il importait d'examiner cette hypothèse de plus près et en particulier de rechercher quelles modifications elle nous obligerait à apporter aux lois de la gravitation. C'est ce que j'ai cherché à déterminer; j'ai été d'abord conduit à supposer que la propagation de la gravitation n'est pas instantanée, mais se fait avec la vitesse de la lumière. Cela semble en contradiction avec un résultat obtenu par Laplace qui annonce que cette propagation est, sinon instantanée, du moins beaucoup plus rapide que celle de la lumière.

Quand nous parlerons donc de la position ou de la vitesse du corps attirant, il s'agira de cette position ou de cette vitesse à l'instant où l'onde gravifique est partie de ce corps; quand nous parlerons de la position ou de la vitesse du corps attiré, il s'agira de cette position ou de cette vitesse à l'instant où ce corps attiré a été atteint par l'onde gravifique émanée de l'autre corps; il est clair que le premier instant est antérieur au second.

# Résultats **conceptuels** nouveaux de Poincaré 1905 (1)

- Introduction explicite du « Postulat de Relativité »  
(« impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre »)
- amélioration et simplification de la preuve donnée par Lorentz  
(« j'ai été seulement conduit à les modifier et à les compléter dans quelques points de détail ; ... »)  
essentiellement il change la définition de  $\rho'$  pour assurer l'invariance de forme des équations de Maxwell-Lorentz, et prouve le caractère naturel de sa définition de  $\rho'$
- du coup, il prouve l'invariance (**exacte**) de forme des équations de Maxwell-Lorentz (avec sources) sous les transformations de Lorentz.



## Résultats **conceptuels** nouveaux de Poincaré 1905 (2)

- cette invariance **exacte** montre que « *l'ensemble de toutes ces transformations, joint à l'ensemble des toutes les rotations de l'espace, doit former un groupe.* »
- il obtient une « *explication possible de la contraction de l'électron, en supposant que l'électron, déformable et compressible, est soumis à une sorte de pression constante extérieure dont le travail est proportionnel aux variations du volume.* »
- il pose et résoud le problème d'écrire une généralisation de la loi d'attraction gravitationnelle Newtonienne qui soit covariante sous le groupe de Lorentz(-Poincaré)
- il en déduit que la « *propagation de la gravitation n'est pas instantanée, mais se fait à la vitesse de la lumière* » ; il parle d' « *onde gravifique* », et montre que les modifications à la loi de Newton sont d'ordre  $v^2/c^2$ .



# Résultats techniques nouveaux de Poincaré 1905 (1)

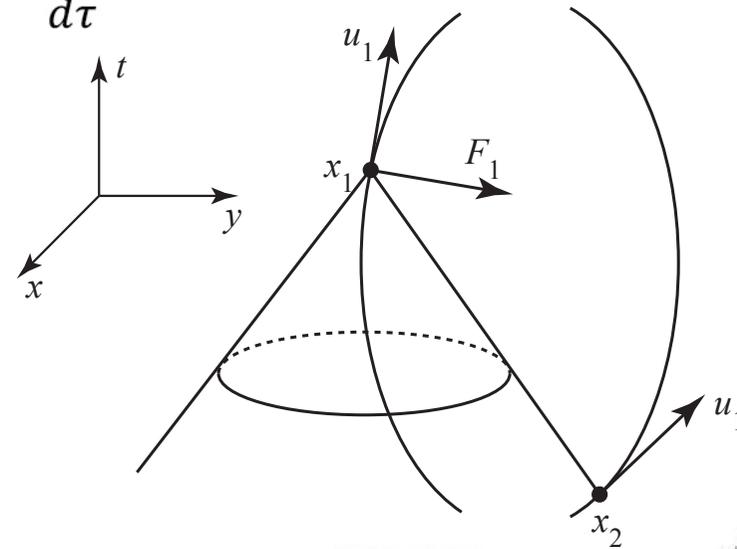
- il montre que  $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$  est invariant
- il montre que  $A_\mu = 4$ -vecteur, cad se transforme comme  $x^\mu = (x, y, z, t)$
- que  $\frac{1}{2} F_{\mu\nu}^2 = E^2 - B^2$  et  $\frac{1}{2} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = E \cdot B$  sont invariants
- structure du groupe de Lorentz :  $[K_x, K_y] = J_z$  etc, et la loi de composition des vitesses (de deux boosts).
- il déduit de l'action EM  $\int d^4 x F_{\mu\nu}^2$ , l'action  $\int ds = \int dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$  d'un électron.



## Résultats techniques nouveaux de Poincaré 1905 (2)

- Il suggère de considérer  $(x, y, z, it)$  comme un point dans un « espace à 4 dimensions » : « Nous voyons que la transformation de Lorentz n'est qu'une rotation de cet espace autour de l'origine, regardée comme fixe. »
- il en déduit les invariants que l'on peut faire avec  $x_1^\mu - x_2^\mu$ , et les deux

quadriviteses  $u_1^\mu = \frac{dx_1^\mu}{d\tau}$ ,  $u_2^\mu = \frac{dx_2^\mu}{d\tau}$



# Poincaré : cours à la Sorbone hiver 1906-1907 (1)

« Les limites de la loi de Newton », publié seulement en 1953 !

« Relativité » : il regarde (en tenant compte de la contraction de Lorentz) ce que donne la synchronisation par échange croisé de signaux optiques entre deux stations A, B en mouvement de translation. Il trouve  $\tau = t - \gamma vx'/c^2$  (qui suppose qu'une horloge en mouvement marque le temps absolu). Il ne remarque pas que  $\tau$  diffère de  $t'$  du facteur  $\gamma$  ( $\tau = \gamma t'$ ), et identifie ces deux temps sous le nom commun de « temps apparent ».

[[l'un des points cruciaux de l'article d'Einstein était de comprendre que la « dilatation des temps »  $dt' = d\tau/\gamma = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$  modifiait le concept de temps, et conduisait à des effets observables par comparaison d'horloges en mouvements.]]

• Il dérive la modification relativiste de  $F = ma$  de la condition d'invariance relativiste ainsi que la forme de l'action  $\sim \int dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$



# Poincaré et « les prémices de la relativité générale » (1)

1 - 1887 « Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie » {merci à John Stachel} P. considère la géométrie non-euclidienne de signature « Lorentzienne » associée à un hyperboloïde à une nappe. C'est en fait la géométrie d'un espace-temps de de Sitter à 2 dimensions !

2 - 1902 Science et Hypothèse : l'Espace et la Géométrie : discussion profonde de l'origine des concepts géométriques, et explication opérationnelle du « monde non euclidien ». [[il a eu une influence marquante sur Einstein, quand il construisit la R.G.]]

3 - 1905 Rend. Palermo : [gravito-magnétisme](#)



## Poincaré et « les prémices de la relativité générale » (2)

4 – 1906-7 « Les limites de la loi de Newton ». Il discute en détail des tests du « principe d'équivalence » (attraction gravitationnelle  $\sim$  masse inertielle) obtenus en Mécanique Céleste (après Laplace) et conclut à une limite  $< 2 \times 10^{-8}$

5 – 1906-7 il calcule l'avance du périhélie de Mercure induit par des théories « relativistes » de la gravitation (mais pas les siennes)

6 – 1908 « La dynamique de l'électron » : il prédit que « l'onde (gravifique) d'accélération » émise par un système planétaire dans une théorie relativiste de la gravitation va dissiper l'énergie du système, et qu'il en résultera une accélération séculaire des périodes orbitales.



# Poincaré et « les prémices de la relativité générale » (3)

Toutes ces idées discutées ou introduites par P. ont eu ,  
des années après une grande importance

- 1 → géométrie de l'espace-temps de de Sitter
- 2 → influence marquante (et reconnue avec chaleur) sur Einstein, quand il construisit la Relativité générale
- 3 → tests du principe d'équivalence pour des corps célestes
- 4 → avance des périhélies en RG
- 5 → preuve de la propagation de la gravitation à la vitesse de la lumière via l'observation de l'accélération séculaire des périodes orbitales de pulsars binaires



# Poincaré et « les prémices de la relativité générale » (4)

Mais on notera les conclusions personnelles de Poincaré :

- Sur la « vraie » géométrie du monde physique : « *une géométrie ne peut pas être plus vraie qu'une autre ; elle peut seulement être **plus commode**. Or la géométrie euclidienne est et restera la plus commode...* » (Science et Hypothèse)
- Sur le périhélie de Mercure et les théories relativistes de la gravitation : P. ne fait pas remarquer que les théories qu'il a introduites seraient capable d'expliquer cette avance, il conclut que l'explication la plus vraisemblable est un anneau circulant entre Mercure et Vénus.



# Poincaré ou la Relativité sans la Relativité

Poincaré a voulu un principe de relativité tout en gardant (comme Lorentz) l'Espace Absolu (identifié à l'Ether) et le temps Absolu : « temps vrai », « temps apparent ».

Il n'a sans doute pas lu Einstein 1905, et a étonné les gens de Göttingen en donnant en avril 1909 une conférence sur « La Mécanique nouvelle) où il ne mentionnait ni Einstein, ni Minkowski. Mittag-Leffler lui écrit en juillet 1909 et lui signale l'existence de leurs travaux. P. n'a jamais cité Einstein (mais seulement Lorentz) en liaison avec la Relativité. Cf controverse avec Klein sur l'attribution de nom : Fuchsien/Kleinéen.

De plus :

« Si vous ne lui apportiez que des propositions qu'il considérait comme acquises -- et , dans sa tendance à aller de l'avant, il regardait comme virtuellement acquis tout ce dont nous n'étions plus séparés par des difficultés de principe – si vous ne lui ouvriez pas des aperçus nouveaux pour lui, on devinait qu'il avait aux lèvres l'éternel et décourageant « à quoi bon ? » (Lettre de P. Boutroux à Mittag-Leffler, 1913)

P. combinait une technicité mathématique extraordinaire, permettant des percées formelles révolutionnaires, avec un esprit conservateur et une épistémologie conventionnaliste.



# « L'Espace et le Temps » (1)

Conférence de P. faite le 4 mai 1912 à l'Université de Londres

Tout se passe comme si le temps était une quatrième dimension de l'espace ; et comme si l'espace à quatre dimensions résultant de la combinaison de l'espace ordinaire et du temps pouvait tourner non seulement autour d'un axe de l'espace ordinaire, de façon que le temps ne soit pas altéré, mais autour d'un axe quelconque. Pour que la comparaison soit mathématiquement juste, il faudrait attribuer des valeurs purement imaginaires à cette quatrième coordonnée de l'espace ; les quatre coordonnées d'un point de notre nouvel espace ne seraient pas  $x, y, z$  et  $t$ , mais  $x, y, z$  et  $i t$ . Mais je n'insiste pas sur ce point ; l'essentiel est de remarquer que dans la nouvelle conception l'espace et le temps ne sont plus deux entités entièrement distinctes et que l'on puisse envisager séparément, mais deux parties d'un même tout et deux parties qui sont comme étroitement enlacées de façon qu'on ne puisse plus les séparer facilement.

.....



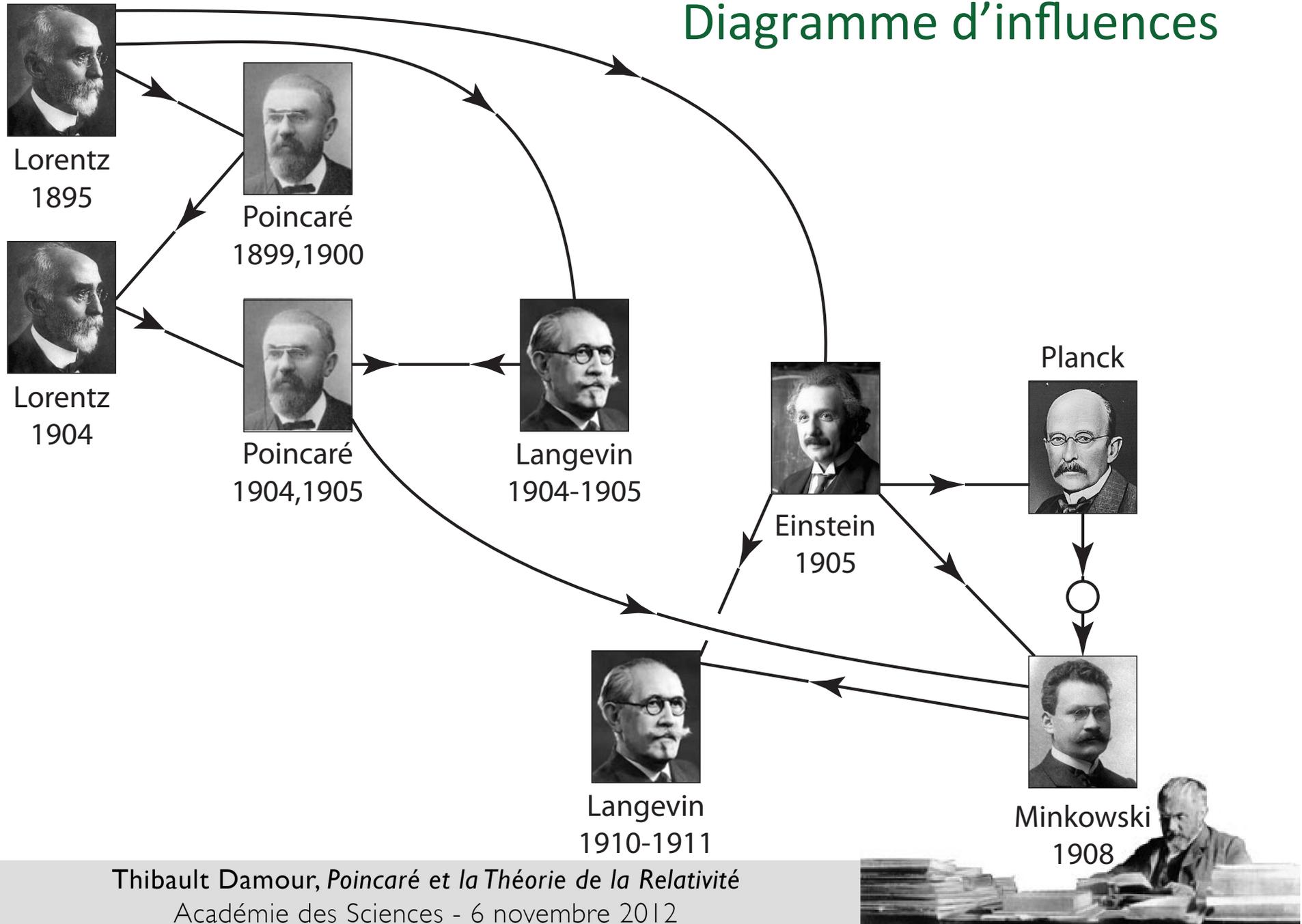
## « L'Espace et le Temps » (2)

Conférence de P. faite le 4 mai 1912 à l'Université de Londres

Quelle va être notre position en face de ces nouvelles conceptions ? Allons-nous être forcés de modifier nos conclusions ? Non certes : nous avons adopté une convention parce qu'elle nous semblait commode, et nous disions que rien ne pourrait nous contraindre à l'abandonner. Aujourd'hui certains physiciens veulent adopter une convention nouvelle. Ce n'est pas qu'ils y soient contraints ; ils jugent cette convention nouvelle plus commode, voilà tout ; et ceux qui ne sont pas de cet avis peuvent légitimement conserver l'ancienne pour ne pas troubler leurs vieilles habitudes. Je crois, entre nous, que c'est ce qu'ils feront encore longtemps.



# Diagramme d'influences



## A qui la faute ? (1)

Si Einstein n'avait pas existé, les contributions physiques et mathématiques de P. à la relativité auraient sans doute été complétées (et interprétées physiquement) par des auteurs ultérieurs en donnant lieu à tout ce que Einstein a apporté dès juin 1905. Les contributions de P. auraient été reconnues comme étant fondatrices. Mais cela n'a pas été (pendant longtemps) le cas.

A qui la faute ?

- A Poincaré lui-même : il attribue tout à Lorentz (y compris le « principe de relativité ») et minimise ses contributions : *« j'ai été seulement conduit à les [résultats de Lorentz] modifier et à les compléter dans quelques points de détail ; on verra plus loin les différences qui sont d'une importance secondaire »* a part la publication de sa Note (assez cryptique) au CRAS, il publie ses contributions essentielles dans des endroits assez confidentiels (jubilé de Lorentz, Rend. Circolo Matematico di Palermo) ou dans des livres de vulgarisation (où il ne cite que Lorentz).



## A qui la faute ? (2)

- à Langevin : qui était le mieux informé sur Lorentz + Poincaré mais qui, dans son cours au Collège de France 1910-1911 parle de Lorentz, Einstein et Minkowski sans (?) citer Poincaré
- à Minkowski : qui, après avoir étudié en détail Poincaré 1905, omet de le citer dans sa célèbre conférence sur « Raum und Zeit » de Septembre 1908. cf T. Damour arXiv:0807.1300 ; cf contexte des relations France-Allemagne, politiquement et scientifiquement, e.g. citation d'Hurwitz.  
*« Je crains que les jeunes talents des français soient plus intensifs que les nôtres, de sorte que nous devons maîtriser tous leurs résultats pour les surpasser ».*
- à la Rédaction des Annales Scientifiques de l'E.N.S. (et à A. Hennequin et J. Marty) qui publia dès 1909 une traduction française de la conférence « Espace et Temps » de Minkowski sans ajouter de commentaire sur les contributions antérieures de Poincaré.
- à l'éditeur (A. Sommerfeld ?) du livre « Das Relativitätsprinzip » Teubner, 1913 puis 1922 qui n'a pas inclus, même un fragment, d'article de Poincaré



## En revanche :

- merci à (F. Klein et) W. Pauli, dont le livre (et article) sur la théorie de la relativité de 1921 rend justice à Poincaré
- merci à E. P. Wigner (Inönü, Wigner 1952 ; merci à S. Walker) pour avoir remplacé le nom de « groupe de Lorentz inhomogène » par « groupe de Poincaré » (ce qui est tout à fait approprié).
- merci à H. Thirring 1927 [cité par G. Petiau (?) 1954], E.T. Whittaker 1953, ....
- merci aussi à Einstein qui n'avait sans doute jamais lu de travaux de Poincaré sur la relativité, mais qui :
  - (1) a salué « le sagace et le profond Poincaré) en discutant des rapports entre « la géométrie et l'expérience » (Einstein 1921), et
  - (2) a écrit (en 1955) :



## En revanche (suite)

*« There is no doubt that the special theory of relativity, if we regard its development in retrospect, was ripe for discovery in 1905. Lorentz had already recognized that the transformations named after him are essential for the analysis of Maxwell's equations, and Poincaré deepened this insight still further. Concerning myself, I knew only Lorentz's important work of 1895 [...] but not Lorentz's later work, nor the consecutive investigations by Poincaré. In this sense my work of 1905 was independent. [...] The new feature of it was the realization of the fact that the bearing of the Lorentz transformation transcended its connection with Maxwell's equations and was concerned with the nature of space and time in general. A further new result was that the "Lorentz invariance" is a general condition for any physical theory ».*

(Einstein à Carl Seilig, 19 février 1955).





## Lorentz/Poincaré hommage Acta Math. 1921



« Ce furent ces considérations publiées par moi en 1904 qui donnèrent lieu à Poincaré d'écrire son article « Sur la dynamique de l'électron » dans lequel il a attaché mon nom à la transformation dont je viens de parler. [...] pour certaines des grandeurs physiques qui entrent dans ces formules, je n'ai pas indiqué la transformation qui convient le mieux. *Cela a été fait par Poincaré et ensuite par M. Einstein et Minkowski...* (Si) ces formules ne se trouvent pas dans mon mémoire, c'est que... j'avais l'idée qu'il y a une différence essentielle entre les systèmes... Dans l'un, on se sert – telle était ma pensée – d'axes de coordonnées qui ont une position fixe dans l'éther et de ce que l'on peut appeler le temps vrai, dans l'autre, au contraire, on a des grandeurs auxiliaires. J'ai pu voir plus tard dans le mémoire de Poincaré que j'aurais pu obtenir une plus grande simplification encore. Ne l'ayant pas remarqué, *je n'ai pas établi le Principe de relativité comme rigoureusement et universellement vrai. Poincaré au contraire a obtenu une invariance parfaite... et a formulé le Postulat de Relativité, terme qu'il a été le premier à employer [...]* ajoutons qu'en corrigeant ainsi les imperfections de mon travail, il ne me les a jamais reprochées. [...] *Je rappelle ces idées de Poincaré [sur  $x, y, z, i, t$ ] parce qu'elles se rapprochent des méthodes dont Minkowski et d'autres savants se sont servis plus tard pour faciliter les opérations mathématiques qui se présentent dans la théorie de la relativité.* »

