

Poincaré et le principe de relativité.

Michel Paty

► **To cite this version:**

Michel Paty. Poincaré et le principe de relativité.. Congrès International Henri Poincaré, May 1994, Nancy, France. p. 101-143. halshs-00182765

HAL Id: halshs-00182765

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00182765>

Submitted on 27 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1994*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.

en gras: modifications, 2004.

Poincaré et le principe de relativité^A

Michel PATY^B

Où l'on traite en premier lieu des caractères du principe de relativité physique et des problèmes qu'il soulève, selon les conceptions de Poincaré, de la mécanique à l'optique et à l'électromagnétisme ; puis de sa mise en évidence et de son rôle dans la formulation relativiste de la théorie physique proposée par Poincaré, indépendamment du travail d'Einstein, de la dynamique de l'électron à la gravitation. On analyse ensuite le statut et la fonction du principe de relativité selon Poincaré, en relation au concept d'éther, en comparaison avec les autres principes de la physique, mais également en ce qui concerne le rapport du principe de relativité des mouvements en physique à la relativité de l'espace de la géométrie. On relève que ce principe s'inscrit dans une pensée de la dynamique (électromagnétique) qui détermine la condition de covariance. On se pose en outre la question de savoir si le principe de relativité est restreint, chez Poincaré, aux seuls mouvements d'inertie, tout en procédant à une comparaison de la relativité au sens de Poincaré et au sens d'Einstein, en ce qui concerne son origine, sa fonction et sa signification, ainsi que la place du principe dans la structure de la théorie. On montre, en particulier, que c'est la question de la dynamique qui caractérise le mieux la différence de l'approche de Poincaré par rapport à celle d'Einstein, puisque, pour ce dernier, la dépendance a lieu en sens inverse (la covariance s'impose à toute dynamique). On s'interroge enfin sur la question d'une éventuelle évolution de la pensée de Poincaré qui aura pu lui faire prendre en compte ultérieurement certains aspects du point de vue d'Einstein - quand nous savons, par ailleurs, que la réciproque est évidente, du moins quant à l'importance d'un point de vue formel pour la théorie physique, considérée

^a Conférence au Congrès International Henri Poincaré, Nancy, 14-18 mai 1994.

^b Equipe REHSEIS (UPR 318), CNRS, Paris et Université Paris 7-Denis Diderot.

par Einstein, à la suite de Poincaré, et consécutivement à la découverte de la relativité générale.

INTRODUCTION

L'histoire des idées, en particulier l'histoire des sciences, comme l'histoire en général, exige de se décentrer pour comprendre, c'est-à-dire d'abandonner notre référence actuelle. En ce qui concerne le principe de relativité, nous avons aujourd'hui spontanément le point de vue de la théorie d'Einstein telle qu'elle s'est imposée universellement à partir des années vingt, Relativité générale comprise. Et notre compréhension de la Relativité restreinte elle-même est indubitablement marquée par la Relativité générale, par le fait que la seconde a suivi la première comme sa continuation naturelle, et que son succès, dû à sa forme mathématique et à son accord avec des observations significatives - alors, les deux premiers tests de la théorie¹ - a grandement contribué à faire accepter la théorie de la relativité restreinte, développée par Einstein en 1905, et déjà formulée par celui-ci dans le sens qu'elle devait garder et qui est celui d'une théorie de la covariance².

Si la réorganisation de la théorie de la relativité sous le point de vue de la covariance correspond à la manière dont on la conçoit généralement aujourd'hui, c'est sans doute, comme l'aurait peut-être dit Poincaré s'il avait vécu assez longtemps pour connaître la Relativité générale, parce que c'est le point de vue le plus commode pour exprimer les lois de la physique sous une forme simple. Ce point de vue ne pouvait évidemment pas être acquis d'emblée, et l'histoire du principe de relativité est, rétrospectivement, l'histoire de l'établissement et de la légitimation du point de vue de la covariance comme l'un des premiers principes de la physique³.

La pensée de Poincaré concernant le principe de relativité constitue l'un des maillons les plus essentiels de cet établissement. Nul ne doutait, parmi les spécialistes de l'optique théorique et de l'électromagnétisme durant les deux premières décennies de ce siècle, de l'importance majeure de ses contributions dans ces domaines. Mais son «malheur», aux yeux réducteurs de la postérité, aura été que le «point de vue de la covariance» surgit, dans toute sa force et en pleine possession de la réorganisation structurelle qu'il impliquait pour la théorie, au

¹ Pour mémoire: avance séculaire du périhélie de Mercure, courbure des rayons lumineux au voisinage de la masse du Soleil.

² Paty [1993a], chapitres 4 et 5.

³ Il est possible de voir, de cette manière rétrospective, certains chapitres de l'histoire de la physique comme résumés par l'identification et l'établissement d'un principe général correspondant. Par exemple, la mécanique analytique et le principe de moindre action, de Lagrange à la formulation générale de Hamilton et Jacobi (cf. Viot [1994]), ou la thermodynamique et le deuxième principe (principe de Carnot sur l'irréversibilité).

moment précis où lui-même parvenait à l'expression achevée de son propre travail théorique sur l'électrodynamique des corps en mouvements. Ses résultats comportaient l'énoncé complet du principe de relativité, les formules de transformation relativiste des coordonnées d'espace et du temps, ou transformations «de Lorentz»⁴, la formule de composition des vitesses (que Lorentz n'avait pas donnée), et la mise en forme covariante des équations de l'électromagnétisme.

En 1904, en effet, Poincaré identifie le principe de relativité dans le nouveau sens que lui donne l'électrodynamique, à savoir, le «principe de relativité de M. Lorentz», qui demande, sur une base expérimentale, les hypothèses du «temps local» et de la «contraction des longueurs»⁵. C'est à ces conditions que le principe de relativité des mouvements de la mécanique est préservé dans le domaine électromagnétique. En 1905, il le formalise et le justifie dans son article «Sur la dynamique de l'électron»⁶, en le basant sur les propriétés des transformations de Lorentz, dont il montre qu'elles préservent la forme du principe de moindre action. Ce travail de Poincaré, écrit en juillet 1905 et paru l'année suivante dans le *Bulletin du Cercle mathématique de Palerme*, allait même au-delà de celui pratiquement contemporain d'Einstein, puisqu'il préparait les conditions de la formalisation mathématique par Minkowski de l'espace-temps de la Relativité restreinte d'Einstein⁷ et proposait une approche «covariante» (au sens restreint) de la gravitation.

Ce qui nous importe, en vérité, bien que la comparaison entre le point de vue de Poincaré et celui d'Einstein (qui ne se sont pas confrontés directement⁸) soit riche de leçons instructives, ce n'est pas de savoir ce qui a manqué à Poincaré pour parvenir à la théorie d'Einstein quand il disposait, avant ce dernier, de tous les éléments conceptuels et théoriques nécessaires. Une telle formulation revient à adopter le point de vue rétrospectif de la chose jugée, de la «vérité sanctionnée», qui ne rend pas justice à ce qui, précisément, a permis à cette histoire de se réaliser. Comme s'il y avait eu, alors, une seule attitude possible, une réponse et une seule, devant les questions posées par la physique, quand nous savons, en vérité, que la pensée de Poincaré et ses contributions font partie du corpus de la théorie de la relativité restreinte et ont eu un rôle décisif dans la mise au jour du caractère fondamental du principe de relativité en physique, au-delà de la

⁴ C'est Poincaré qui les dénomma lui-même ainsi en 1905. Elles furent données dans leur forme exacte et définitive par Lorentz [1904], reprises par Poincaré [1905a et b], et découvertes indépendamment par Einstein [1905].

⁵ Poincaré [1904a].

⁶ Poincaré [1905b et c].

⁷ Minkowski [1907], [1908a] et [1908b]. Minkowski se réfère expressément à la notation de Poincaré du temps comme quatrième coordonnée imaginaire de l'espace dans Minkowski [1908b].

⁸ Sinon par des conversations au Conseil Solvay de 1911, où ils se rencontrèrent pour la première et la dernière fois, et dont nous n'avons qu'un écho très indirect (Voir, plus loin, la section sur l'évolution de la pensée de Poincaré).

mécanique.

Nous voudrions avant tout comprendre les circonstances et les raisonnements par lesquels Poincaré s'est trouvé amené à affirmer l'importance de ce principe et à en exprimer les conséquences. Le parcours proposé ici ne sera pas seulement historique: nous tenterons de saisir les différentes dimensions, physiques et épistémologiques, du principe de relativité au sens de Poincaré. Il va de soi que ce qui vient d'être dit sur l'arbitraire des jugements de valeur rétrospectifs n'enlève pas son intérêt à l'«analyse récurrente», qui utilise ce qu'il faut de notre connaissance et de notre point de vue actuels pour nous éclairer sur une époque ou un auteur du passé, en nous permettant de discerner, dans les travaux étudiés, la nouveauté qui émerge et s'avèrera déterminante.

Il n'était pas évident pour beaucoup, en 1905, que ce qui était le plus important, en physique - du moins concernant un large domaine -, c'était le principe de relativité. Les physiciens étaient, alors, avant tout préoccupés de l'électrodynamique (pour les corps en mouvement), objet explicite des recherches aussi bien de Max Abraham, Alfred Bücherer, Walter Kaufmann, Paul Langevin, que de Hendryk Antoon Lorentz, Henri Poincaré et Albert Einstein, ces trois derniers seulement ayant établi un lien étroit entre l'électrodynamique et le principe de relativité.

On ajoutera, concernant la pensée de Poincaré sur la relativité au moment où la théorie s'établit, qu'en 1907, puis en 1912, il envisage le «principe de relativité physique» de la manière la plus générale comme l'invariance sous une déformation physique déterminée, mais quelconque, de la forme des corps matériels, qui correspond à une transformation quelconque des coordonnées.

Toutes ces considérations, dont la proximité et la différence avec les conceptions d'Einstein sont patentes, nous invitent à nous interroger sur le statut et sur le rôle du principe de relativité des mouvements chez Poincaré. Indiquons-en, avant de les détailler, quelques uns des caractères les plus significatifs.

Le statut du principe de relativité se fixe, selon lui, comme celui des autres principes physiques, lorsque la physique mathématique, avec ses équations différentielles, remplace l'approche mécanique des systèmes. Comme eux, il est appelé désormais à guider la formulation des théories physiques. D'origine empirique, le principe de relativité se transforme en une convention de définition. Tautologique si on le considérait en toute rigueur (portant sur l'ensemble de tous les corps de l'univers), il s'avère alors chargé d'effets si on l'applique à l'approximation de systèmes séparés.

D'un autre côté, pour Poincaré, le principe de la relativité des mouvements n'est autre que l'une des formes de la relativité de l'espace, selon sa manière de voir qui considère l'espace seulement à travers les corps à partir desquels nous le concevons. Par là, le principe de relativité se rattache à la question de la nature de la géométrie, non pas directement, mais par l'intermédiaire des corps, sans la considération desquels l'espace est «amorphe» et «malléable». Cette remarque n'est d'ailleurs pas sans évoquer le «mollusque de

référence» de la Relativité générale d'Einstein: pourtant, la signification physique attachée à ces deux qualifications reste très différente, en raison des points de vue respectifs des deux savants sur les médiations qui opèrent entre l'espace et les corps (pour Poincaré, on en revient toujours, en matière d'espace, aux instruments, c'est-à-dire, en définitive, aux corps; pour Einstein, on construit à partir des corps un espace physique de référence). Il est possible de voir dans cette dissemblance, qui se manifeste dans leurs conceptions sur le rapport de la physique à la géométrie, l'une des sources de leurs différences d'approches du problème de ce qui devait s'appeler la théorie de la relativité.

S'il fallait conclure cette introduction, nous le ferions, bien qu'il ne soit pas possible d'en détailler l'analyse dans ce qui suit, en tentant de caractériser les conceptions et les méthodes respectives de Poincaré et d'Einstein sur la théorie physique mathématisée : c'est, chez Einstein, une physique théorique à proprement parler, conçue comme construction théorique à partir de principes fondateurs dont le lien aux faits d'expérience est indirect et intuitif; alors qu'il s'agit, chez Poincaré, d'une physique «mathématique et théorique» hybride, comme application d'une physique mathématique formalisée à la spécificité physique de problèmes indiquée directement par les résultats d'expérience. Cette différence contribue aussi à rendre compte de l'écart entre leurs théories relativistes (théorie de la relativité d'Einstein, théorie relativiste de l'électron de Poincaré) quant à leur structure et à leur contenu physique⁹.

⁹ Le présent travail prolonge des études précédentes faites par l'auteur sur les contributions respectives de Poincaré et d'Einstein à la relativité restreinte, notamment sous l'angle d'une comparaison entre leurs styles et leurs conceptions respectives: voir l'article «Physical Geometry and Special Relativity: Einstein and Poincaré», in Boi, Flament et Salanski [1992], et le livre *Einstein philosophe*, PUF, Paris, 1993. Voir également «The scientific reception of relativity in France», in Glick [1987].

LA PHYSIQUE ET LA
RELATIVITÉ DES MOUVEMENTS

Si Poincaré énonce en 1904 le «principe de relativité» pour l'électrodynamique, c'est bien antérieurement que son intérêt s'est porté sur «la relativité des mouvements». Il est nécessaire de distinguer les trois étapes de l'établissement de cette propriété devenue principe, en mécanique, en optique, et enfin en électrodynamique. Nous essaierons, brièvement, d'en faire ressortir les traits saillants, caractéristiques de chacun de ces domaines de la physique, tels qu'ils se manifestent dans la pensée de Poincaré.

Mécanique

Dans le chapitre de *La science et l'hypothèse* consacré à «La mécanique classique»¹⁰, Poincaré énonce de la manière la plus précise ce que signifie, en matière de contenu des concepts, la relativité des mouvements pour «les faits mécaniques». Sur l'espace: «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.» Sur le temps: «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. 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 (...).» Cette remarque est étayée par son analyse de la mesure du temps de 1898¹¹, d'où il concluait que «la simultanéité de deux événements, ou l'ordre de leur succession, l'égalité de deux durées, doivent être définies de telle sorte que l'énoncé des lois naturelles soit aussi simple que possible».

Il ne s'en tient pas là, et aborde aussi la question de la géométrie : «Enfin notre géométrie euclidienne n'est elle-même qu'une sorte de convention de langage; nous pourrions énoncer les faits mécaniques en les rapportant à un espace non euclidien qui serait un repère moins commode, mais tout aussi légitime que notre espace ordinaire; l'énoncé deviendrait ainsi beaucoup plus compliqué; mais il resterait possible»¹². Ce qui nous invite à considérer la relation entre la relativité et la nature de la géométrie dans un sens différent de celui posé

¹⁰ Poincaré [1902a], chap. 6. Ce chapitre du livre et le suivant sont repris de la communication «Sur les principes de la mécanique» faite au Congrès international de philosophie, Paris, août 1900.

¹¹ Poincaré y renvoie d'ailleurs: Poincaré [1898a].

¹² Poincaré [1902a], p. 112.

à propos de la théorie de la relativité générale¹³.

La critique des concepts absolus de la mécanique newtonienne, inspirée notamment par celle de *La mécanique* de Mach, s'accompagne cependant, chez Poincaré, d'une conception conventionnaliste qui les apparente à l'arbitraire d'un langage donné (voire, comparaison qu'il utilisera à propos de la géométrie, d'un choix de système d'unités): «L'espace absolu, le temps absolu, la géométrie même (...) ne préexistent pas plus à la mécanique que la langue française ne préexiste logiquement aux vérités que l'on exprime en français». Ce conventionnalisme le conduit à admettre une position pragmatique qui maintient, provisoirement, certains de ces concepts, au nom de la plus grande commodité: il déclare laisser de côté l'espace absolu (mais il ne laissera pas l'éther de l'optique et de l'électromagnétisme: il fait d'ailleurs une différence entre les deux, nous y reviendrons), et admettre «provisoirement le temps absolu et la géométrie euclidienne»¹⁴.

Toujours dans *La science et l'hypothèse*, au chapitre sur «Le mouvement relatif et le mouvement absolu»¹⁵, Poincaré rappelle le «principe du mouvement relatif» (les lois d'un système quelconque sont les mêmes, que les axes auxquels on le rapporte soient fixes ou qu'ils soient mobiles, entraînés dans un mouvement rectiligne et uniforme) et déclare qu'il «s'impose à nous pour deux raisons: d'abord, l'expérience la plus vulgaire le confirme, et ensuite l'hypothèse contraire répugnerait singulièrement à l'esprit»¹⁶. Le principe du mouvement relatif stipule que les accélérations des corps qui constituent un système ne dépendent que des différences des coordonnées et des vitesses entre les corps qui constituent le système, non des grandeurs absolues correspondantes.

D'un autre côté, Poincaré appelle «loi d'inertie généralisée», la propriété, démontrée par l'Astronomie, que l'accélération d'un corps ne dépend que de la position de ce corps et des corps voisins et de leurs vitesses»¹⁷, c'est-à-dire, du point de vue mathématique, que les mouvements des corps dépendent d'équations différentielles du deuxième ordre (c'est une généralisation naturelle de la loi d'inertie). Ainsi, le principe du mouvement relatif ressemble fort au «principe d'inertie généralisé», à ceci près qu'il traite des différences de coordonnées et non des coordonnées elles-mêmes¹⁸. Il ne concerne en toute rigueur que le mouvement du centre de gravité de l'ensemble des corps de l'univers entier¹⁹. Il se réduirait à une tautologie si on ne l'appliquait, de fait, à l'approximation de systèmes séparés.

¹³ Paty [1992a].

¹⁴ Poincaré [1900d], repris dans [1902a], p. 112. Souligné par H.P.

¹⁵ Poincaré [1902a], chap. 7.

¹⁶ Poincaré [1902a], éd. 1968, p. 129.

¹⁷ Poincaré [1902a], éd. 1968, p. 113.

¹⁸ Poincaré [1902a], éd. 1968, p. 130.

¹⁹ Poincaré [1902a], éd. 1968, p. 122: «La loi du mouvement du centre de gravité n'est rigoureusement vraie que si on l'applique à l'univers tout entier».

Par ailleurs, Poincaré s'interroge sur la restriction du principe du mouvement relatif aux seuls mouvements d'inertie: «Pourquoi le principe n'est-il vrai que si le mouvement des axes mobiles est rectiligne et uniforme? (...) Il semble qu'il devrait s'imposer à nous avec la même force, si ce mouvement est varié ou tout au moins s'il se réduit à une rotation uniforme»²⁰. Or ce n'est pas le cas, de façon évidente²¹. Mais alors, à quoi rapporter, sans espace absolu, une rotation ? Suit une discussion sur les forces centrifuges, que l'on ne peut, en dernier ressort, expliquer par l'action mutuelle des corps: il serait possible de rétablir la symétrie de l'espace pour les lois du mouvement en inventant de nouvelles forces, et ainsi de suite. La complication qui en résulte est aussi grande que celle des sphères de Ptolémée: en conséquence, «il est bien plus simple d'admettre que la Terre tourne»²². Autrement dit, les lois de la mécanique peuvent, de cette façon, être exprimées dans un langage plus simple²³. On voit que c'est par le recours à l'approximation, liée au choix de convention, que Poincaré réussit à maintenir un sens physique effectif à des propositions qui comportent une part de tautologie ou d'arbitraire (nous y reviendrons).

Optique

Dans ses *Leçons sur la théorie mathématique de la lumière*, données à l'Université de Paris en 1887 et 1891²⁴, où il expose et examine de manière critique et comparative les questions de l'optique théorique indépendamment de toute explication par la théorie électromagnétique - dans la perspective de les reprendre ensuite sous ce rapport, ce qu'il fait par ailleurs dans *Electricité et optique*²⁵ -, Poincaré aborde en particulier les problèmes de l'optique des corps en mouvement. Son approche rend manifeste le lien qui le rattache à la tradition des opticiens français, inaugurée par Augustin Fresnel et poursuivie au long du dix-neuvième siècle avec Hippolyte Fizeau, Charles Augustin Coulomb, Jacques Babinet, Auguste Cornu, Eleuthère Mascart, Alfred Potier, Joseph Boussinesq et d'autres. Il s'agit chez lui d'un intérêt déjà ancien, précoce même, remontant à ses années d'étude à l'École Polytechnique²⁶, où il reçut l'enseignement de Cornu, et où il eut lui-même, semble-t-il, l'idée de faire des expériences sur les lois de la biréfringence en rapport au mouvement d'entraînement de la Terre²⁷.

²⁰ Poincaré [1902a], chap 7.

²¹ Il évoque, pour le mouvement rectiligne non uniforme, l'expérience d'un obstacle heurté par un mobile, un corps placé à l'intérieur de ce dernier poursuivant son mouvement d'inertie; ainsi que, pour la rotation, le pendule de Foucault (Poincaré [1902a], éd. 1968, p. 131).

²² Sur ce point, voir aussi Poincaré [1904b].

²³ Poincaré [1902a], éd. 1968, p. 133.

²⁴ Poincaré [1889a] et [1892a].

²⁵ Poincaré [1890a], [1891a], [1901a].

²⁶ Les années 1873-1875.

²⁷ Je dois cette information à Scott Walter, séminaire sur la jeunesse de Poincaré, Equipe

Poincaré fait sienne les conclusions de Mascart du point de vue expérimental, et de Potier d'un point de vue plus théorique, sur la relativité du mouvement eu égard aux lois de l'optique, du moins à l'ordre de l'aberration (c'est-à-dire au premier ordre en $\frac{v}{c}$, v étant la vitesse de la Terre et c celle de la lumière dans le vide). Il admet également la dissociation entre le coefficient de Fresnel et l'hypothèse de l'entraînement partiel de l'éther telle que ce dernier l'avait proposée: dans la formule $V' = V \pm v(1 - \frac{1}{n^2})$ ²⁸ inférée par Fresnel à partir de son hypothèse d'un entraînement partiel de l'éther pris dans les corps qui lui sont perméables, n figure l'indice de réfraction moyen du corps traversé (résultant de la considération de la densité moyenne). Désormais, l'indice n et la longueur d'onde λ correspondante sont ceux relatifs au rayon considéré: dans la double réfraction et la double polarisation circulaire, le coefficient de Fresnel, et donc la modification de la vitesse, ne sont pas les mêmes pour les deux rayons, ordinaire et extraordinaire²⁹. Mais c'était là une propriété empirique, dont ne rendaient pas compte les théories mathématiques disponibles de l'optique³⁰. Désormais, lorsque Poincaré parle d'«entraînement partiel», il l'entend dans le sens de cette réinterprétation du coefficient de Fresnel.

Ce n'est qu'avec la théorie électrodynamique de Lorentz³¹ qu'une explication en sera proposée. Il faudrait évoquer ici les analyses faites par Poincaré de la théorie électromagnétique dans son rapport à l'optique, qui lui font choisir la théorie de Maxwell, et ensuite prolonger ce choix dans celui de la théorie de Lorentz³². Nous nous contenterons de mentionner ici le caractère fondamental de la théorie de Maxwell, qui rapporte l'électromagnétisme, et par là, l'optique, à la «physique mathématique», au même titre que la mécanique et le rôle central que revêt alors, à ses yeux, l'expérience de Fizeau. Le principe du mouvement relatif pour l'optique est acquis sur une base factuelle. Poincaré l'exprime alors de la manière suivante : «il est impossible de rendre manifeste le mouvement absolu de la matière, ou mieux le mouvement relatif de la matière pondérable par rapport à l'éther; tout ce qu'on peut mettre en évidence, c'est *le*

REHSEIS du CNRS et Université Paris 7, 15.3.1994.

²⁸ Fresnel [1818]. Cf. Mayrargue [1991] et [à paraître, a et b]. Le coefficient d'entraînement de Fresnel est $(1 - \frac{1}{n^2})$. V est la vitesse de la lumière dans le milieu réfringent au repos, V' celle dans

le milieu animé d'un mouvement de vitesse v , laquelle n'est autre que la vitesse («absolue») de la Terre dans son mouvement annuel autour du Soleil (selon les notations généralement en vigueur à l'époque).

²⁹ Mascart [1874], p. 420. Cf. Pietrocola [à paraître, b].

³⁰ Poincaré [1889a], p. 393. Voir Paty [à paraître b].

³¹ Il s'agit de la théorie de Lorentz sans l'hypothèse de contraction des longueurs (Lorentz [1892], [1895]).

³² Faute de place pour le détailler ici, nous renvoyons à notre étude complémentaire: Paty [à paraître b].

mouvement de la matière pondérable par rapport à la matière pondérable»³³.

A ce stade, l'expérience de Michelson et Morley ne fait que confirmer celle de Fizeau. Son statut changera peu à peu, en fonction de la signification théorique des termes du deuxième ordre³⁴. La théorie de Lorentz ne rend compte à cet égard qu'«imparfaitement» du «principe du mouvement relatif» que toutes les expériences pour mettre en évidence la translation de la Terre semblent indiquer, bien qu'elle puisse expliquer le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley moyennant l'hypothèse supplémentaire de contraction des longueurs³⁵. Il relie cette difficulté à celle qui concerne la loi de l'action et de la réaction³⁶, émettant l'idée que les deux «lacunes» seront peut-être «comblées en même temps»³⁷.

On relèvera, en tout état de cause, la constante préoccupation de Poincaré pour la question de la relativité des mouvements, de l'optique en tant que telle à sa théorie électromagnétique. Le problème semble toutefois se poser désormais de la manière suivante: en passant de la mécanique à l'optique et à l'électromagnétisme, le principe de relativité s'élargit tout en s'appauvrissant, en acquérant un caractère seulement approximatif. Les exposés et les recherches de Poincaré sur l'électrodynamique apparaissent en grande partie axés sur une considération de cette nature. Cette orientation de départ marquera sa conception ultérieure du principe de relativité, lorsqu'il aura pu le rétablir dans son universalité.

La théorie électrodynamique

L'optique et l'électrodynamique des corps en mouvement constituent donc, pour Poincaré, une préoccupation déterminante. On le voit à la manière systématique dont il examine, dans la troisième partie de son cours sur *Electricité et optique* - professé en 1899 -, les théories de Hertz, de Larmor et de Lorentz³⁸, les comparant en fonction de certaines exigences qu'il avait déjà formulées en 1895³⁹. Ces conditions, auxquelles doit satisfaire toute théorie électrodynamique des corps en mouvement, sont au nombre de trois. En premier lieu, elles doivent être en accord avec l'expérience de Fizeau, c'est-à-dire «avec l'entraînement partiel de l'éther, ou, ce qui revient au même, des ondes électromagnétiques

³³ Poincaré [1895b], in *Oeuvres*, vol. 9, p. 412. Souligné par moi, M.P.

³⁴ Voir, p. ex., la seconde édition d'*Electricité et optique* (Poincaré [1901a, troisième partie, p. 518, 536], qui en parle comme d'une «exception», puis l'article de 1905 (voir plus loin).

³⁵ Poincaré [1900b], in *Oeuvres*, vol. 9, p. 482.

³⁶ Poincaré [1895b], in *Oeuvres*, vol. 9, p. 412.

³⁷ *Ibid.*, p. 413.

³⁸ Poincaré [1901a], 3ème partie: «Nouvelles théories électrodynamiques. Théorie de Hertz et théorie de Maxwell» (p. 341 et suiv.)

³⁹ Poincaré [1895b], in *Oeuvres*, vol. 9, p. 395-413: «Discussion de la théorie de Hertz».

transversales». En second lieu, elles doivent respecter le principe de conservation de l'électricité et du magnétisme. En troisième lieu, enfin, elles doivent s'accorder «avec le principe de l'égalité de l'action et de la réaction».

La théorie de Hertz satisfait aux deux dernières conditions, non à la première. Poincaré reprend cette constatation dans son ouvrage de 1901, en spécifiant que «les équations de Hertz gardent la même forme dans le mouvement relatif et dans le mouvement absolu», et en soulignant leur désaccord avec 'certains phénomènes optiques', c'est-à-dire l'entraînement partiel des ondes électromagnétiques par les corps (aberration et expérience de Fizeau), puisque dans cette théorie les ondes sont totalement entraînées⁴⁰. A ce stade de la pensée de Poincaré, la relativité des mouvements (que satisferaient, par leur forme, les équations de Hertz) passe donc en fait, au second plan, dès lors que l'éther est en jeu et non pas seulement les corps, puisqu'elle s'opposerait à l'expérience de Fizeau, c'est-à-dire à l'entraînement partiel. Cette considération, tient, on le voit, à l'identification de l'expérience de Fizeau avec l'entraînement partiel de l'éther, Poincaré revenant en quelque sorte à une conception dynamique du coefficient de Fresnel, sans aucun doute en considération de ce que la lumière est désormais pourvue de sa théorie, l'électromagnétisme, qui est une dynamique de l'éther⁴¹.

Quant à la théorie de Lorentz, elle satisfait aux conditions 1 et 2, mais non à la troisième, la conservation du principe de l'action et de la réaction⁴²: c'était son seul défaut, soulignait Poincaré dès 1895, tout en précisant : «La difficulté n'est pas particulière à la théorie de Lorentz seule et (...) l'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»⁴³. Le lien entre le principe de relativité et le principe de réaction, déjà évoqué, représente l'un des maillons sensibles de la pensée de Poincaré concernant l'électrodynamique et le mouvement. Il lui consacre, de manière significative, un important article dans le livre d'hommage présenté à Lorentz en 1900, qu'il conclut en ces termes -

⁴⁰ Poincaré [1901a], cf. *supra*. Déjà, dans Poincaré [1895b], il relevait que la théorie de Hertz, pour cette raison, «est absolument contraire à l'expérience célèbre de M. Fizeau qui nous apprend que l'entraînement n'est que partiel», cependant que la théorie de Fresnel rend compte des faits de l'aberration et de l'entraînement partiel de l'éther, «non exactement, mais au degré d'approximation dont nous nous contentons ici, c'est-à-dire en négligeant la dispersion». Il prenait donc la théorie de Fresnel, en l'adaptant aux phénomènes électriques, c'est-à-dire augmentée des hypothèses de la théorie de Helmholtz pour la dispersion, qui rendent explicites les actions de l'éther et de la matière (Poincaré [1895b], p. 395 et suiv.). Par ailleurs, dans son texte de 1895, Poincaré indique que la théorie de Helmholtz satisfait aux conditions 1 et 3 ci-dessus, mais non à la seconde: elle ne conserve pas la quantité d'électricité (*ibid.*, p. 391). Poincaré indique également que la théorie de Thomson présente des difficultés.

⁴¹ Voir plus haut notre remarque sur la nature du coefficient de Fresnel.

⁴² Poincaré [1895b], p. 395. Voir aussi Poincaré [1900b]. Ces remarques de Poincaré ont servi de point de départ à Max Abraham pour formuler sa théorie de la masse électromagnétique de l'électron et de la distinction entre la masse longitudinale et la masse transversale (Abraham [1903]).

⁴³ *Ibid.*, p. 392.

reprenant un remarque faite antérieurement - : «Ainsi, d'après la théorie de Lorentz, le principe de réaction ne doit pas s'appliquer à la matière seule ; le principe du mouvement relatif ne doit pas non plus s'appliquer à la matière seule [nous pouvons ici expliciter : comme c'était le cas avec la mécanique]. Ce qu'il importe de remarquer, c'est qu'il y a entre ces deux faits une connexion intime et nécessaire»⁴⁴.

Le principe de réaction, qui provient de la mécanique, est, pour Poincaré, de portée plus générale que les seuls phénomènes de la mécanique, et il semble raisonnable de le considérer comme légitime pour tous les phénomènes qui font intervenir le mouvement.. C'est, du moins, ce qui ressort de la réponse qu'il propose à la question: «Pourquoi le principe de réaction s'impose-t-il à notre esprit? C'est, le plus souvent, répond-il, parce que sa négation conduirait au mouvement perpétuel. Et Poincaré fait voir, calcul à l'appui - pour un système conservatif, la somme de la force vive et de l'énergie potentielle est égale dans le système au repos et dans le système en mouvement -, le principe de réaction «comme une conséquence de celui de l'énergie et de celui du mouvement relatif»⁴⁵. Ce dernier s'impose donc également à l'esprit, du moins tant qu'on l'applique à un système isolé ; car il n'en va plus de même quand on l'applique à un système matériel qui n'est plus isolé, mais qui comporte aussi l'éther.

Les voies de la réforme de l'électrodynamique

Aucune des théories disponibles de l'électrodynamique et de l'optique des corps en mouvements n'est donc satisfaisante et, tout en décidant de s'en tenir à la moins défectueuse de toutes, celle de Lorentz, Poincaré critique ces théories l'une par l'autre en tentant de voir ce qui leur manque. Il montre en particulier qu'il faudrait ajouter une force, qui n'apparaît pas (ou qui serait négligeable) dans la théorie de Lorentz : une force «que l'expérience n'a pu encore déceler et qui consisterait dans une action d'un champ électrique sur un corps qui serait le siège d'un champ magnétique variable»⁴⁶. La conclusion demeure la même que celle formulée en 1895: «Les contradictions auxquelles toutes les hypothèses viennent se heurter paraissent tenir à une cause profonde»⁴⁷.

Le «temps local» de Lorentz est un autre trait dont Poincaré relève l'importance, en soulignant - ce qu'il est alors le seul à faire, Lorentz lui-même n'y voyant qu'un intermédiaire de calcul, artificiel et purement mathématique - ses implications du point de vue physique. Le temps local apparaît directement relié à la relativité des mouvement, puisqu'il permet de la faire respecter de manière approximative (à l'ordre de l'aberration), en dépit de l'entraînement

⁴⁴ Poincaré [1900b], p. 488. Voir plus haut.

⁴⁵ Poincaré [1900b], p. 482.

⁴⁶ Poincaré [1901a], p. 412.

⁴⁷ Poincaré [1895b], in *Oeuvres*, vol. 9, p. 394.

partiel de l'éther. Plus généralement que le calcul du coefficient de Fresnel, indique-t-il en effet dans l'édition de 1901 d'*Electricité et optique*⁴⁸, la théorie de Lorentz permet de démontrer que «le mouvement de la Terre n'influe pas sur les phénomènes optiques si on néglige les carrés» de termes qui sont de l'ordre de l'aberration. Les formules de transformation qui expriment ce fait, avéré par les expériences d'optique les plus précises⁴⁹, font intervenir le temps local de Lorentz, t' , fonction de la position et différent de t par l'origine en chaque point⁵⁰. Poincaré s'interroge sur sa différence avec le temps t et trouve : $t' - t = \frac{1}{3.10^9} \text{sec}$.

La différence du temps local (il parle en termes de «différence entre le temps vrai et le temps local»), est donc négligeable.

Bien que son introduction dans la théorie ne soit pas suivie d'effet directement observable, le temps local de Lorentz possède, pour Poincaré, une signification physique qu'il s'est attaché à expliciter dès son travail de 1900 sur «La théorie de Lorentz et le principe de réaction»⁵¹. Le temps local, est donné dans la théorie de Lorentz par : $t' = t - \frac{xy}{V^2}$ (V étant la vitesse de la lumière). Cette relation correspond, précisément, à la définition du temps que peuvent se faire des observateurs A et B , en mouvement avec le système mais ignorant qu'ils sont en mouvement (clause qui laisse voir la référence maintenue à un temps absolu), quand ils règlent leurs montres par l'envoi de signaux lumineux de A à B et de B en A , en supposant que ces signaux mettent le même temps dans les deux sens. Ceci toutefois ne suffit pas pour admettre une équivalence totale entre le mouvement absolu et le mouvement relatif: Poincaré considère, dans ce même travail de 1900, que les énergies «apparentes» dans le mouvement relatif sont différentes des énergies «réelles» du mouvement absolu - car il faut tenir compte de la «force apparente complémentaire» intervenant dans le mouvement relatif mais non dans le mouvement absolu⁵².

L'hypothèse de contraction des longueurs, ajoutée par Lorentz à sa théorie pour rendre compte de l'expérience de Michelson et Morley, est un autre aspect des problèmes de l'électrodynamique dont Poincaré s'est également préoccupé. Elle n'apparaît toutefois, dans ses premières réflexions, qu'au second plan et son importance ne devint prépondérante que progressivement. Dans les textes que nous avons étudiés jusqu'ici, Poincaré s'attache essentiellement à la considération des effets du premier ordre, qui concernent l'aberration et

⁴⁸ Poincaré [1901a], 3ème partie, chapitre 6: «Phénomènes optiques dans les corps en mouvement».

⁴⁹ Poincaré rappelle ces résultats en soulignant que les expériences d'optique sont très précises sur les déterminations de position: la position des franges et leur intensité n'étant pas modifiées par l'entraînement, ces expériences ne mettent pas en évidence le mouvement de la Terre (Poincaré [1901a], p. 534-535).

⁵⁰ «L'origine des temps étant différente aux différents points», écrit Poincaré (*ibid.*).

⁵¹ Poincaré [1900b].

⁵² Poincaré [1900b], p. 483.

l'expérience de Fizeau. On ne la voit pas mentionnée dans les exigences formulées pour une théorie satisfaisante de l'électrodynamique, ni en tant que telle, ni sous la forme de ses interprétations possibles en termes de propriété générale, à savoir soit la constance et l'isotropie de la vitesse de la lumière indépendamment de tout mouvement, soit le respect du principe de relativité. Remarquons que les deux interprétations ne sont pas équivalentes tant que la théorie électromagnétique de la lumière ne respecte pas ce principe⁵³.

Dans cette première phase, Poincaré s'en tenait à indiquer que l'optique et l'électrodynamique n'obéissent à la relativité des mouvements que de manière approximative, et ne s'attardait pas particulièrement à la question du second ordre ni des ordres supérieurs. La signification de l'expérience de Fizeau - ou, dans ses termes, de l'entraînement partiel de l'éther - prévalait sur celle de l'expérience de Michelson. Cette dernière, dont la précision est également très grande, constitue cependant une difficulté supplémentaire de la théorie de Lorentz dont la signification et l'importance s'éclairent à mesure que s'impose le principe de relativité. L'expérience de Michelson, indique Poincaré dans l'édition de 1901 d'*Electricité et optique*, amène à l'hypothèse de contraction, qui est «un véritable 'coup de pouce' donné par la nature pour éviter que le mouvement de la Terre puisse être révélé par les phénomènes optiques»⁵⁴. Et d'exprimer alors son «sentiment»⁵⁵ : «Cela ne saurait me satisfaire». Ce jugement reflète ses conceptions de nature méta-théoriques, tant sur la réalité des phénomènes de la nature que sur les caractères que l'on doit attendre d'une théorie satisfaisante appartenant à la «physique mathématique», dont les explications doivent être directes et générales, sans artifice particulier et multiplication d'hypothèses en fonction d'une spécificité supposée de phénomènes par ailleurs analogues.

La théorie de Lorentz permet de démontrer que «le mouvement de la Terre n'influe pas sur les phénomènes optiques si on néglige les carrés» de termes qui sont de l'ordre de l'aberration⁵⁶. Mais si l'on tient compte de ces termes, en

⁵³ Les réinterprétations de la théorie de la relativité, après l'adoption de la théorie d'Einstein, transcrivent d'emblée le résultat de l'expérience de Michelson, et plus généralement des expériences optiques visant à mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre, en termes d'isotropie de la vitesse de la lumière (elles sont dites d'ailleurs «expériences d'anisotropie terrestre»), identifiée au principe de relativité pour l'électromagnétisme, tandis qu'Einstein s'en tint, dans son approche particulière du problème de l'électrodynamique, à la seconde formulation, c'est-à-dire en termes du principe de relativité. La distinction entre les deux tient précisément à la difficulté suscitée par la question de l'éther, et à la différence, à cet égard, entre la théorie (qui énonce la constance de c , mais non dans le cas du mouvement) et l'expérience. Sur cet aspect, cf. Paty [1993a], chapitre 3.

⁵⁴ Poincaré [1901a], troisième partie, chap. 6, p. 536. Souligné par H.P.

⁵⁵ Einstein parlait, dans une circonstance semblable, de «conviction».

⁵⁶ Dans le chapitre 7 d'*Electricité et optique* (Poincaré [1901a], troisième partie), consacré à «l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes électriques proprement dits», Poincaré relève la présence, dans les phénomènes électrostatiques tels que les décrit la théorie de Lorentz, de termes du premier ordre (contrairement à ce que dit Lorentz dans le *Versuch* de 1895); mais il remarque qu'ils conduisent à des actions négligeables (p. 543).

carré de l'aberration, «le mouvement de la Terre exerce alors son influence sur les phénomènes optiques»⁵⁷. Or l'expérience de Michelson montre que ce n'est pas le cas, quant aux phénomènes. L'analogie de ces derniers suscite la considération, au-delà de cette expérience particulière, de tous les effets du second ordre, et même des effets à tous les ordres: ce passage, de la considération d'un ordre à tous les ordres, constitue le moment même de la généralisation, l'énoncé d'une exigence universelle que la théorie doit suivre. Il annonce un nouveau cours de la pensée de Poincaré concernant l'électrodynamique, qui est en fait le retour, malgré l'éther, à un principe de relativité qui soit respecté sans restriction.

La relativité des mouvements est, de fait, un ultime aspect de la question de l'électrodynamique qui retient Poincaré, et c'est elle qui va déterminer - aussi bien chez lui que chez Lorentz -, le dernier pas, décisif, de la mise au point d'une théorie électrodynamique satisfaisante. Il déclare en effet, dans *Electricité et optique*, en 1901: «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*. A mesure que les expériences deviendront plus exactes, ce principe sera vérifié avec plus de précision»⁵⁸. Désormais, pour lui, «une théorie bien faite devrait permettre de démontrer le *principe* dans toute sa rigueur»⁵⁹. Ce principe, dont la dénomination de «principe de relativité» ne sera donnée qu'en 1904, par Poincaré lui-même - et indépendamment par Einstein, en 1905 -, se trouve donc déjà formulé pour ce qui est de son contenu, dès 1901, et en réalité dès 1899, année où Poincaré donna son cours.

Cette «démonstration» du principe des mouvements relatifs, la théorie de Lorentz ne la fait pas encore, mais c'est elle qui est le plus près de le faire. Elle devait y parvenir quelque temps plus tard. Tel fut, en effet, le sens du travail de Lorentz publié en 1904 et de celui de Poincaré, rédigé en 1905 : formuler une théorie de l'électrodynamique qui, précisément, *démontre* le principe de relativité en toute rigueur. On relèvera le sens dans lequel le terme «démontrer» est ici utilisé: c'est la théorie qui démontre le principe de relativité; et tel est, effectivement, le rapport de la théorie électrodynamique de Lorentz et de Poincaré au principe de relativité. L'élaboration théorique précède l'énoncé du principe; au contraire, dans le travail d'Einstein, la construction théorique est déterminée par sa soumission au principe - c'est, si l'on peut dire, le principe de relativité qui démontre la théorie (et ses formules de transformation). Relevons, incidemment, que le propos d'une telle démonstration - dans le sens de Poincaré - rejoint celui que nous avons rencontré avec le travail de Potier, «démontrant», à partir des résultats des expériences d'optique, la formule généralisée de Fresnel (expression

⁵⁷ Poincaré [1901a], troisième partie, chap. 6, p. 518.

⁵⁸ Poincaré [1901a], troisième partie, chap. 6, p. 536. Souligné par moi, M.P.

⁵⁹ *Ibid.* Souligné par moi, M.P.

de la relativité des mouvements au premier ordre). Pour une raison semblable (le rôle de l'expérience de Michelson et de la contraction des longueurs), on pourra considérer, d'un point de vue fondamental, la théorie de Lorentz et de Poincaré comme étant de nature empirique.

*La dynamique de l'électron
et le principe de relativité*

C'est à la phase finale de cette construction théorique que nous en venons maintenant. Il s'agit donc de reformuler l'électrodynamique, selon des indications désormais bien précisées, depuis les premières remarques critiques de 1895 qui mettaient déjà en évidence cette nécessité, par tous ses travaux effectués entretemps. En soulignant, dans son texte de 1900 sur «La théorie de M. Lorentz et le principe de réaction», les difficultés montrées par l'expérience de Fizeau quant au principe de réaction, étant donné que le principe du mouvement relatif ne peut plus être considéré comme s'il s'appliquait à la matière seule⁶⁰, et la nécessité de faire la correction qui rapporte le phénomène au temps local (impliquant une modification de la vitesse), Poincaré en tirait cette conclusion qu'il fallait consentir à modifier profondément toutes nos idées sur l'électrodynamique, et renvoyait à son travail sur la théorie de Larmor.

Dans cette perspective, c'est sur la théorie de Lorentz qu'il fallait, à ses yeux, se baser : elle lui paraissait être la meilleure parmi les différentes théories proposées, en particulier parce qu'elle satisfaisait mieux que les autres à ce qu'il allait appeler, en 1904⁶¹, le "principe de relativité de M. Lorentz". Il se proposa donc de clarifier et de perfectionner la théorie de Lorentz, que ce dernier s'efforçait d'ailleurs, parallèlement, et en relation aux remarques de Poincaré lui-même, d'améliorer. C'est ainsi que Lorentz et Poincaré parvinrent à l'expression pratiquement achevée de leur théorie réformée de l'électrodynamique, dans leurs articles respectifs de 1904 et 1905. Comme le travail contemporain et indépendant d'Einstein au titre désormais célèbre, «Sur l'électrodynamique des corps en mouvements», leurs résultats établissaient le statut du principe de relativité pour les phénomènes électromagnétiques et montraient sa portée générale dans la formulation des lois. Lorentz intitulait son article publié en 1904 : "Phénomènes électromagnétiques dans un système en mouvement à une vitesse quelconque plus petite que celle de la lumière", et Poincaré le sien, rédigé en 1905 et paru l'année suivante, tout simplement : "Sur la dynamique de l'électron"⁶².

On trouve dans les trois contributions⁶³, centrées autour du problème de l'électrodynamique et de l'impossibilité de caractériser, en ce qui la concerne,

⁶⁰ «La propagation relative des ondes dans un milieu en mouvement ne suit pas les mêmes lois que la propagation dans un milieu en repos»: tel est l'entraînement partiel (Poincaré [1900b]).

⁶¹ Poincaré [1904a].

⁶² L'article complet fut publié dans le *Bolletino del Circolo Matematico di Palermo* en 1906 (Poincaré [1905c]). La revue le reçut en juillet 1905. Une version très courte, sans les développements de la théorie, fut présentée à l'Académie des sciences de Paris, le 5 juin 1905, et aussitôt publiée dans les *Compte-rendus* (Poincaré [1905b]).

⁶³ Pour une étude comparative des contenus de ces trois travaux, cf. Paty [1993a]. Voir également Paty [1987]. On y trouvera également les références aux études effectuées sur chacun d'eux.

un mouvement absolu, un énoncé du principe de relativité (pour les mouvements d'inertie, c'est-à-dire au sens de la relativité restreinte), les formules de transformation de coordonnées pour passer d'un système d'inertie à un autre (les équations de transformation de Lorentz), celles de la variation de la masse de l'électron avec la vitesse⁶⁴, ainsi que des lois de transformation presque semblables des grandeurs électromagnétiques⁶⁵. Mais les théories proposées se distinguent par l'organisation de leurs systèmes conceptuels (et, rétrospectivement, par leurs prolongements : seule la théorie de la Relativité au sens d'Einstein conduit naturellement à la Relativité généralisée, ou théorie géométrique de la gravitation).

L'article de Poincaré prend son point de départ dans celui de Lorentz, dont il résume l'esprit dans les termes suivants: "Si on peut, sans qu'aucun des phénomènes apparents soit modifié, imprimer à tout le système une translation commune, c'est que les équations d'un milieu électromagnétique ne sont pas altérées par certaines transformations, que nous appellerons *transformations de Lorentz*; deux systèmes, l'un immobile, l'autre en translation, deviennent ainsi l'image exacte l'un de l'autre"⁶⁶. Poincaré, qui ne se propose que d'apporter de légères améliorations à la théorie de Lorentz, expose tout d'abord l'intention physique qui mène son travail dans une longue introduction, puis développe sa théorie de la dynamique de l'électron (relativiste) dans un important déploiement de calculs, et revient en conclusion à des considérations conceptuelles par une extension du problème considéré au cas de la gravitation. Tout en se présentant sous les abords d'un traitement «physico-mathématique» caractérisé, son travail ne se ramène cependant pas à de la pure physique mathématique : il s'agit aussi bien de physique théorique, sur un problème de physique conceptuellement circonscrit, abordé certes de la manière la plus formelle possible, dans la grande tradition de la *Mécanique analytique*, mais toujours avec le souci de parvenir à des conclusions immédiatement physiques, c'est-à-dire relatives aux phénomènes électromagnétiques considérés dans leur spécificité.

L'intention et l'esprit du travail de Poincaré sont tout entiers exprimés dans sa remarque liminaire : "Il semble que cette impossibilité⁶⁷ 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 le *Postulat de relativité* et à l'admettre sans restriction. Que ce postulat, jusqu'ici en accord avec l'expérience, doive être confirmé ou infirmé plus tard par des expériences plus précises, il est en tout cas intéressant de voir quelles

⁶⁴ Ces formules, communes à Lorentz, Poincaré et Einstein, diffèrent de celles d'autres théories comme celle de Max Abraham ou du modèle de Bücherer et Langevin pour l'électron, qui ne respectent pas le principe de relativité.

⁶⁵ Les différences concernent les résultats obtenus par Lorentz, les formules se retrouvant identiques chez Einstein et Poincaré.

⁶⁶ Poincaré [1905c], p. 130.

⁶⁷ Impossibilité qu'il a rappelée dans les premières lignes de l'article.

en peuvent être les conséquences".

Comme l'article de Lorentz sur lequel il s'appuie, celui de Poincaré évoque d'entrée de jeu les expériences relatives à la mise en évidence du mouvement absolu de la Terre par rapport à l'éther, et leurs résultats négatifs. Celles du 'premier ordre' (en v/c) ont trouvé une explication satisfaisante par la théorie de Lorentz⁶⁸, alors que celles du second ordre (en $\frac{v^2}{c^2}$) requièrent des hypothèses particulières, spécifiques à chacune d'elles, et d'ailleurs limitées au second ordre, comme la contraction de Lorentz-FitzGerald pour l'expérience de Michelson et Morley. Poincaré souligne alors l'insuffisance de telles hypothèses si «on voulait admettre dans toute sa généralité le postulat de relativité», et indique que Lorentz s'est précisément attaché, dans son récent travail⁶⁹, «à compléter [sa théorie] et à la modifier de façon à la mettre en concordance parfaite avec ce postulat». Il reste encore à parfaire la rigueur de la formulation, en diminuant encore les hypothèses requises, et en étendant la portée.

Dans cette perspective, il fait valoir les propriétés remarquables des formules de transformation de Lorentz, obtenues pour exprimer les résultats d'expérience⁷⁰, et qui permettent de construire un principe de relativité adapté aux exigences propres de la théorie électromagnétique. Prenant, dans une première partie, ces formules de manière pour ainsi dire axiomatique, en leur donnant une forme générale dans laquelle la vitesse relative des repères n'intervient qu'à titre de paramètre, c'est-à-dire sans passer par une transformation de Galilée (à la différence de Lorentz), il en déduit les implications sur les grandeurs physiques qui caractérisent la dynamique de l'électron : une même forme (covariance) pour les équations transformées du champ électromagnétique, une équation conservée de la densité de charge électrique (à la différence de Lorentz), une expression de la force de Lorentz (différente de celle trouvée par ce dernier)⁷¹. Toutes ces formules sont également obtenues par Einstein en partant d'un point de vue différent (au lieu de déduire le principe de relativité de formules suggérées par l'expérience, Einstein démontre les formules à partir du principe admis d'emblée comme transcrivant une propriété générale des phénomènes).

⁶⁸ Celle formulée dans Lorentz [1892b] et [1895].

⁶⁹ Lorentz [1904].

⁷⁰ Les équations fondamentales de l'électrodynamique, écrit-il, "sont susceptibles d'une transformation remarquable découverte par Lorentz et qui doit son intérêt à ce qu'elle explique pourquoi aucune expérience n'est susceptible de nous faire connaître le mouvement absolu de l'univers" (Poincaré [1905c], p. 132). Les équations sont:

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

(Poincaré note k là où nous notons γ , avec les définitions appropriées. l et ε sont des constantes quelconques, ε est la vitesse du système en mouvement par rapport à celui qui est au repos (exprimée en unités de vitesse de la lumière, c'est-à-dire v/c , que l'on dénote aujourd'hui β).

⁷¹ Poincaré trouve en outre qu'il faut une autre force, appliquée aux électrons, que celle de nature électromagnétique si l'on veut préserver l'équilibre de la charge en mouvement d'un électron sphérique transformé en ellipsoïde.

Un rapprochement important entre les résultats de Poincaré et ceux d'Einstein (et par contre, une distance avec ceux de Lorentz) concerne la formule de transformation des vitesses, qui se trouve en fait au cœur de la théorie de la relativité⁷². Poincaré, admettant - implicitement - d'emblée que les grandeurs transformées possèdent une signification physique, obtient la vitesse d'un mobile dans un repère par simple dérivation des coordonnées, et constate que la loi de composition diffère de l'addition galiléenne⁷³. Einstein y parvient de même, mais en accompagnant pas à pas la justification du caractère physique des grandeurs transformées. Le point commun et décisif entre Einstein et Poincaré, sur la formule des vitesses, est qu'ils n'ont fait ni l'un ni l'autre appel aux transformations galiléennes de coordonnées, considérant directement les transformations de Lorentz indépendamment d'elles (Lorentz en faisait au contraire une étape intermédiaire, correspondant à un contenu physique effectif). La formule de composition exprime immédiatement la constance et le caractère limite de la vitesse de la lumière dans le vide⁷⁴: cette conséquence pour Poincaré, n'est pour Einstein qu'une vérification, puisqu'elle constituait son deuxième postulat (après le principe de relativité).

Les deux parties suivantes de l'article de Poincaré reprennent le problème à partir du principe de moindre action, qui permet de retrouver les grandeurs physiques, et les équations auxquelles elles obéissent, en soumettant l'expression de l'action elle-même à la transformation, rendant ainsi compte du «succès de la transformation de Lorentz». Poincaré montre ensuite que ces transformations forment un groupe continu, dont il écrit l'invariant, $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$, pour lequel il a considéré la quatrième coordonnée imaginaire ict ⁷⁵.

La dynamique de l'électron en mouvement, obtenue à partir des grandeurs pour l'électron au repos, est dès lors déterminée, et il est possible de choisir entre les différents modèles théoriques proposés⁷⁶. Poincaré conclut que

⁷² Cf. Paty [1993a], chapitre 2.

⁷³ Pour la première composante ξ' de la vitesse du mobile de coordonnée χ' dans le système en mouvement animé d'une vitesse ε : $\xi' = \frac{d\chi'}{dt} = \frac{\xi + \varepsilon}{1 + \xi\varepsilon}$ (les vitesses sont exprimées en unités de la vitesse de la lumière).

⁷⁴ Comme on le voit en égalant l'une des deux vitesses, ε ou ξ , à c , c'est-à-dire à 1 dans le système d'unités choisi par Poincaré.

⁷⁵ C'est la quatrième partie de l'article. Minkowski reprendra ces notations (Minkowski [1908b]). Poincaré écrit explicitement la quatrième coordonnée temporelle ict (en fait, il prend un système d'unité où $c = 1$, et écrit $\sqrt{-1}$ pour i), et parle d'espace à quatre dimensions dans la dernière partie de l'article, relative à la gravitation. Il note que "la transformation de Lorentz n'est qu'une rotation de cet espace [à quatre dimensions] autour de l'origine, regardée comme fixe" (p. 168).

⁷⁶ Modèle de l'électron rigide de Max Abraham, modèle d'un électron à volume constant de Bücherer et Langevin, modèle de l'électron contracté dans le sens du mouvement de Lorentz. Poincaré démontre que ce dernier seulement respecte le principe de relativité. Il faut toutefois lui adjoindre la condition d'une force supplémentaire (la pression de Poincaré, qu'il conçoit comme

«l'hypothèse de Lorentz est la seule qui soit compatible avec l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu», et annonce même qu'«aucune expérience ne pourra mettre en évidence le mouvement absolu»⁷⁷.

On notera que, tout en accordant une pleine et égale signification physique aux espaces et aux temps dans les systèmes respectivement en repos et en mouvement⁷⁸, Poincaré ne remet à aucun moment en cause, dans son travail de 1905, le temps absolu de la mécanique newtonienne ni l'éther de la conception «mécaniste» de l'optique et de l'électromagnétisme. Il est simplement muet à leur sujet. Cependant, le concept de temps sous-jacent à la grandeur physique qu'il traite n'est plus celui de la mécanique classique. Quant à l'éther, il n'est pas seulement l'espace absolu de la mécanique (alors qu'Einstein l'y réduit), mais une entité dynamique pour laquelle il n'est, après tout, pas étonnant que les coordonnées d'espace soient indissociablement liées au temps. Peut-être d'ailleurs en va-t-il de même du temps, comme des vitesses : leur forme particulière est tributaire des phénomènes électromagnétiques dans lesquels ils interviennent, c'est-à-dire de la dynamique électromagnétique. Nous y reviendrons.

Gravitation

La réforme de l'électrodynamique opérée, Poincaré se rendit compte qu'elle entraînait des conséquences en-dehors de l'électrodynamique elle-même. Elle tenait, en effet, à la vitesse finie - très grande - de la propagation des actions électromagnétiques. Des actions, même non électromagnétiques, propagées à une vitesse semblable, devaient également être soumises aux formules de transformation de Lorentz. Si la gravitation est dans ce cas, ce qui est vraisemblable, même sans réduction à l'électromagnétisme, la loi de transformation impose une dépendance de la force d'attraction non seulement en fonction des distances, mais des vitesses, et la loi newtonienne doit donc être modifiée.

A l'argument de Laplace suivant lequel la vitesse de l'attraction gravitationnelle devrait, si elle était finie, être très supérieure à la vitesse de la lumière⁷⁹, il oppose, en 1905, que Laplace ne considérait la possibilité de modification de la loi de Newton que sur un point, celui d'une vitesse finie de propagation de l'attraction, alors qu'il est question ici de plusieurs modifications, et qu'elles peuvent fort bien se combiner pour conduire à une autre conclusion. Il précise, en 1909, que la conclusion de Laplace résulte de l'hypothèse qu'il fait, d'une composition de la vitesse de la gravitation et de celle du corps attracteur -

une propriété de l'éther) pour assurer son équilibre.

⁷⁷ Poincaré [1905b], p. 165.

⁷⁸ A la différence de Lorentz, pour qui le temps local est un intermédiaire mathématique sans contenu physique réel.

⁷⁹ Laplace [1795].

comme dans l'explication corpusculaire de l'aberration de la lumière ⁸⁰ -, mais que cette hypothèse n'est plus de mise avec la «théorie de Lorentz»⁸¹ (qui garde c constant).

L'idée d'une propagation de la gravitation qui se fasse non plus instantanément mais avec la vitesse de la lumière avait déjà été émise, par Lorentz et par Wien⁸², dans le cadre d'une réduction de la gravitation à l'électromagnétisme. Poincaré la reprit donc, sans la lier nécessairement à une réduction électromagnétique, dans un dernier paragraphe de son article de 1905⁸³.

Il proposa explicitement d'étendre le postulat de relativité à l'attraction gravitationnelle, et à cet effet, formula pour la première fois la méthode - désormais classique -, pour rechercher les expressions d'une loi physique compatibles avec ce principe, fondée sur la recherche des invariants du groupe de Lorentz. Il mettait, ce faisant, en pratique cette même conception du principe de relativité qu'Einstein devait souligner plus tard, d'être une limitation aux formes *a priori* possibles de la loi⁸⁴. Appliquant la forme obtenue, relativiste (au sens restreint), de la loi de la gravitation au cas de la planète Mercure - cas sensible en raison de son mouvement exceptionnellement rapide⁸⁵ - il trouva une modification du périhélie donnant une valeur plus proche de la valeur observée par Le Verrier que la théorie newtonienne, mais encore beaucoup trop faible.

Ajoutons que Poincaré mentionne, dans son travail de 1905, l'«onde gravifique» associée à l'accélération due à la force de gravitation, en analogie avec l'émission de rayonnement en électrodynamique⁸⁶.

Dans ses exposés ultérieurs concernant le principe de relativité et les transformations de Lorentz, Poincaré reprit le cas de la théorie de la gravitation, mais en la liant plus unilatéralement à l'hypothèse de Lorentz d'une origine électromagnétique de l'attraction gravitationnelle, marquant ainsi, plus nettement que dans son travail de 1905, le lien existant à ses yeux entre le groupe d'invariance de Lorentz et l'électromagnétisme⁸⁷. Il est intéressant de noter que, dans sa conférence de 1909 sur «La mécanique nouvelle», Poincaré mentionne la différence entre la masse comme coefficient d'inertie et la masse comme coefficient d'attraction, et note que leur proportionnalité, qui se trouve dans la loi

⁸⁰ La force de gravitation qui en résulte ferait donc un petit angle avec la droite qui joint les deux corps. La limite inférieure de la vitesse de propagation de l'attraction gravitationnelle assignée par Laplace était 10^7 fois la vitesse de la lumière.

⁸¹ Poincaré [1905c], [1909b].

⁸² Lorentz [1900], Wien [1901]. Cf. Paty [1977].

⁸³ Poincaré [1905c].

⁸⁴ *Ibid.*, p. 168.

⁸⁵ Lorentz l'avait également considéré dans ses remarques sur l'origine électromagnétique de la gravitation (Lorentz [1900]).

⁸⁶ Cf. Paty [en prép. 2].

⁸⁷ Poincaré [1908], [1910b et c], [1913]. Poincaré reprend l'hypothèse de Lorentz d'une force de gravitation engendrée par des dipôles électriques légèrement dissymétriques.

de Newton, peut ne plus être valide pour des vitesses élevées, puisque la masse d'inertie croît avec la vitesse alors que rien n'indique que la masse de gravitation varie aussi ou demeure constante. De toute façon, la loi de Newton devra être modifiée pour tenir compte des exigences de la théorie électrodynamique de Lorentz (c'est-à-dire de la relativité restreinte).

STATUT ET FONCTION DU PRINCIPE DE RELATIVITÉ PHYSIQUE

Je voudrais essayer, maintenant, de caractériser les traits majeurs qui accompagnent, dans la pensée de Poincaré, le principe de relativité en tant qu'il est partie prenante de la théorie physique. Cela concerne la question de la nature de l'espace et de l'éther, celle du rapport entre relativité et dynamique, celle de la fonction du principe de relativité comparé aux autres principes physiques, ainsi que l'évolution de la pensée de Poincaré sur le principe de relativité après 1905.

L'espace et l'éther

«Le principe du mouvement relatif ne s'impose pas à l'esprit si le système matériel au lieu d'être isolé, implique l'éther», écrivait Poincaré en 1900⁸⁸. Cette remarque met en toute clarté, avant même l'évocation de ses conceptions sur l'espace à propos de la géométrie, la différence qu'il fait entre l'espace absolu et l'éther. Le premier - l'espace absolu - est éliminé par le principe de relativité de l'espace (nous y reviendrons), le second - l'éther - ne l'est pas, car il est d'une autre nature que l'espace : porteur de propriétés physiques, il est donc plutôt de la nature des corps. Le système physique est constitué des corps matériels et de l'éther et, dès lors, n'est plus isolé comme s'il était constitué de corps matériels seulement. Les corps en translation considérés par la mécanique obligent au respect du principe de relativité. Mais les corps optiques - et, plus généralement, électromagnétiques - sont solidaires de l'éther, leur support, dont rien ne dit qu'il doive partager leur mouvement. Poincaré fait cette remarque que «si tous les objets matériels sont entraînés dans une commune translation comme, par exemple, la translation de la Terre, les phénomènes peuvent différer de ce qu'ils seraient si cette translation n'existait pas, parce que l'éther peut ne pas être entraîné dans cette translation»⁸⁹.

⁸⁸ Poincaré [1900b].

⁸⁹ Poincaré [1900b].

L'espace absolu est écarté, dès la mécanique, comme on l'a vu. Reste, avec l'optique et l'électromagnétisme, l'éther, qui est pensé comme physique et comme dynamique: l'inertie de la masse électromagnétique (masse variant avec la vitesse), rapportée à une propriété - dynamique - de l'éther, lui faisait dire: «on croirait toucher l'éther du doigt». Poincaré pense encore ainsi en 1905. Pour lui comme pour Lorentz, l'éther immobile est, d'une part, le lieu physique, doué de propriétés dynamiques, des champs électromagnétiques; d'autre part, il fait fonction de système de coordonnées au repos (c'est un référentiel d'inertie particulier). Alors qu'Einstein, interprétant l'éther immobile de Lorentz, ne lui voit plus, avant même d'être parvenu à la relativité restreinte, d'autre propriété physique que l'immobilité, la dynamique électromagnétique étant portée par les champs: l'éther est donc totalement identifié au système de coordonnées au repos⁹⁰. Nous pouvons présumer sans risque que Poincaré aurait écarté d'emblée l'éther s'il ne l'avait pas pensé comme dynamique, comme il avait rejeté l'espace absolu.

Il est significatif que Poincaré compare le concept d'éther à celui de matière⁹¹. A ses yeux, l'éther (même «électromagnétique») est un concept mécanique, qui assure le lien entre les phénomènes électromagnétiques et les lois de la mécanique⁹². Comme tout concept, il est provisoire, et «un jour viendra sans doute où l'éther sera rejeté comme inutile», alors l'hypothèse de l'existence de la matière sera plus indispensable⁹³.

Cependant, Poincaré lui-même n'a jamais rejeté ce concept. Il persista toujours dans sa conception de l'éther électromagnétique comme un milieu physique, support de la vibration des ondes. L'une des raisons décisives pour que l'éther soit, à ses yeux, différent de l'espace, est que ce dernier n'est une forme vide, malléable : il ne peut donc être physique et dynamique et suffire à la propagation des champs de force. Poincaré ne pense jamais le champ indépendamment de son support, l'éther, comme il ne conçoit pas de cinématique indépendamment de la dynamique. Il maintiendra aussi l'idée de l'entraînement partiel de l'éther et de son explication dynamique : c'est que, pour lui, les formules de Lorentz reviennent à une telle explication de nature dynamique et ne se suffisent pas à elles-mêmes, comme elles le font pour Einstein, dès lors que l'on a accepté le principe de relativité. Dans un article de 1908 intitulé, presque comme celui de 1905, «La dynamique de l'électron», ayant rappelé que l'expérience de Fizeau nous fait choisir, entre l'éther de Hertz et l'éther de Fresnel et de Lorentz, en faveur de ce dernier, Poincaré donne l'explication suivante du

⁹⁰ C'est l'essence des analyses qu'il donnera ensuite de la différence entre l'éther de Hertz et celui de Lorentz: cf. Paty [1993], chap. 3.

⁹¹ Poincaré [1904a].

⁹² Nous renvoyons à l'examen, par ailleurs, des idées de Poincaré sur les rapports entre les concepts de la théorie électromagnétique et ceux de la mécanique, qui sont bien illustrées par le rôle qu'il attribue à l'analogie en physique mathématique (Paty [en prép. 1]).

⁹³ Poincaré [1889a], préface, et [1902a], chap. 12.

coefficient de Fresnel, dans la théorie de l'électron de Lorentz : «Dans les milieux réfringents, où la perturbation est produite à la fois par les vibrations de l'éther et par celles des électrons mis en branle par les agitations de l'éther, les ondulations se trouvent *partiellement* entraînées»⁹⁴.

Relativité et dynamique.

Dans le travail de Poincaré de 1905, la reformulation de la théorie porte tout entière sur la dynamique, puisqu'elle est gouvernée par une «transformation remarquable», remarquable en ceci qu'elle permet d'obtenir la contraction des longueurs et le temps local, considérés sur une base empirique, en les généralisant (à tous les effets semblables considérés à tous les ordres). C'est une théorie dynamique, pour laquelle la modification subie par les grandeurs espace, temps et vitesse (conçues physiquement) provient de la dynamique électromagnétique. Si l'espace et le temps sont reliés par la relation qui fait du temps une quatrième coordonnée d'espace ($x_4 = t\sqrt{-1}$), proposée dans l'article, cette relation directe n'est que formelle. Les grandeurs d'espace et le temps, du point de vue physique, sont considérées indépendamment, chacune à travers la dynamique électromagnétique. Quant à la constance de la vitesse de la lumière et à son caractère limite, elle résulte de la formule de composition des vitesses, déduite de la transformation de Lorentz, et se fonde donc, elle aussi, sur la contraction des longueurs et le temps local. Le principe de relativité et la constance de la vitesse de la lumière sont «démontrés» à partir des formules de transformation de Lorentz, conçues comme nécessitées par l'électrodynamique. La théorie de Poincaré est une théorie relativiste (ou covariante) de l'électrodynamique.

Dans le travail contemporain d'Einstein, l'électrodynamique est réformée par le principe de relativité, moyennant une modification de la signification physique de ce dernier par rapport à celle qu'il avait en mécanique, en comportant implicitement l'addition galiléenne des vitesses. Cette modification, Einstein l'obtient en exigeant la conciliation du principe de relativité avec la constance de la vitesse de la lumière indépendamment du mouvement de sa source, érigée en «second principe» de sa théorie. La conciliation exige l'abandon, indépendamment de toute dynamique particulière, de la règle galiléenne d'addition des vitesses, ce qui est obtenu par une nouvelle définition des grandeurs d'espace et de temps, appropriée à la soumission aux deux principes. Cette nouvelle définition correspond à l'établissement d'une nouvelle cinématique, précédant toute considération de dynamique. La théorie d'Einstein est une théorie de la covariance applicable aux dynamiques particulières, et immédiatement appliquée, en l'occurrence, à l'électrodynamique.

⁹⁴ Poincaré [1908b], in *Oeuvres*, vol. 9, p. 563.

On voit que les «ingrédients» des deux théories, celle de Poincaré et celle d'Einstein, sont essentiellement les mêmes⁹⁵ - et il n'est pas étonnant, dans ces conditions, qu'ils parviennent aux mêmes formules, tant pour les transformations des coordonnées, les distances et les durées, ainsi que la composition des vitesses, que pour les transformations des grandeurs électromagnétiques. Mais l'agencement de ces ingrédients - de ces éléments conceptuels et théoriques - et, corrélativement, leurs contenus physiques, ne sont pas identiques: les contenus ne sont pas indifférents à la structure théorique.

De fait, la différence apparaîtra clairement dans le mouvement qu'entraînera la réflexion sur ces contenus, et de la façon la plus manifeste dans celui qui conduira Einstein à sa formulation propre du problème de la Relativité générale. Celle-ci dépassera la simple formulation relativiste au sens restreint (pour les systèmes d'inertie) de la théorie de la gravitation, à laquelle Poincaré s'en était tenu, en s'interrogeant sur la signification de l'inertie de deux manières : sur le principe d'inertie, d'une part, sur la masse d'inertie, d'autre part. Sa réflexion sur le «privilege» (injustifiable d'un «point de vue philosophique») du principe d'inertie l'amena à généraliser le principe de relativité, par-delà les systèmes d'inertie, aux systèmes accélérés quelconques. Sa réflexion sur la masse d'inertie, coefficient des accélérations, et sur son égalité avec la masse gravitationnelle le conduisit à formuler le principe d'équivalence qui les identifiait - cette égalité n'était qu'une coïncidence fortuite dans la mécanique de Newton, correspondant à l'égalité des accélérations indépendamment des masses dans la loi de la chute des corps.

Ajoutons que la transformation du problème physique de la covariance généralisée en un problème purement mathématique de transformations de coordonnées quelconques et de structure d'un espace non euclidien à quatre dimensions, à laquelle Einstein parvint en 1912, fut directement tributaire de sa conception de la signification physique des grandeurs d'espace et du temps dans sa théorie de la relativité restreinte: la difficulté du problème lui apparut en effet tenir à la limitation de cette signification physique, rapportée à un «espace-temps de référence» lié à des solides invariables (euclidiens) et à des horloges régulières. La nouvelle réforme de l'espace et du temps requise par la Relativité générale fut encore formulée en dégageant la considération de l'espace (et du temps) des propriétés directement dynamiques telles que les modifications de forme subies par un corps solide (problème de la barre tournante), en envisageant un «géométrie pratique» à quatre dimensions (d'espace-temps) dissociée de la physique proprement dite, au sens de la dynamique⁹⁶. Le paradoxe, ou l'ironie des choses, ce fut que, comme résultat de cette procédure, la théorie de la relativité générale d'Einstein manifesta le lien de l'espace-temps et de la dynamique gravitationnelle, puisque la métrique spatio-temporelle, qui exprime la structure

⁹⁵ Ils sont exactement identiques du point de vue formel. Pour une grande part, les significations physiques des grandeurs correspondantes sont équivalentes.

⁹⁶ Paty [1993], chapitre 5.

de l'espace-temps, est donnée par le champ de gravitation.

Par là-même, Einstein retrouvait Poincaré, et le lien indissociable de l'espace et du temps avec la dynamique (mais pour la gravitation, et non pas pour l'électromagnétisme). Il reste que le détour par la considération d'une signification physique propre de l'espace et du temps (et sa critique), indépendamment de la dynamique, fut historiquement nécessaire. C'est ainsi que la théorie de la relativité restreinte au sens d'Einstein pava la voie de la théorie de la relativité générale: où l'on voit comment le contenu physique attribué aux concepts, dans une structure théorique particulière, influe sur les développements ultérieurs.

Ces remarques ont directement à voir avec la question de la géométrie, dont nous reparlerons plus loin⁹⁷.

Statut du principe de relativité

Le statut du principe de relativité selon Poincaré se comprend dans le cadre de sa pensée des principes si l'on considère la situation de l'électrodynamique dans la physique mathématique, et en particulier son rapport à la mécanique. D'une manière générale, les principes de la physique tels que le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, celui de la conservation de la masse, la conservation de l'énergie, le deuxième principe de la thermodynamique, et même les principes variationnels comme celui de moindre action, se sont imposés lorsque la physique mathématique - qui représente les lois par des équations différentielles - s'est substituée à la «physique des forces centrales», c'est-à-dire à l'approche mécanique des systèmes. Ces principes généraux, dont l'origine est expérimentale, sont pris désormais pour guides dans la formulation des théories physiques.

Nous avons suivi les cheminements du principe de relativité dans l'approche de la physique par Poincaré. Considérant la dernière phase des élaborations théoriques, nous l'avons vu acquérir toute sa force avec la formulation d'une théorie électrodynamique satisfaisant pleinement aux critères d'une physique mathématique. Dès lors, le principe de relativité, naguère uniquement valide pour la mécanique, rejoint en toute généralité les autres principes physiques comme l'un des principes à part entière de la «physique mathématique». Comme les autres, le principe de relativité est d'origine empirique, mais, formulé de façon systématique à la lumière de la théorie qui l'implique, il se transforme en une convention de définition, valable à strictement parler pour l'ensemble de tous les corps de l'univers. Il se réduirait à une tautologie si on ne l'appliquait, de fait, à l'approximation de systèmes séparés, et s'avère alors chargé d'effets à l'instar, par exemple, du principe de la

⁹⁷ Pour une étude détaillée des conceptions de Poincaré et d'Einstein, voir Paty [1983], chapitres 6 et 7.

conservation de l'énergie auquel Poincaré le compare volontiers⁹⁸, pour illustrer sa nature et sa fonction: empirique par son origine, de convention par un choix décidé, il a un rôle de discrimination parmi les formes des théories possibles - discrimination que nous avons vue mise en oeuvre dans la correction relativiste de la gravitation newtonienne faite par Poincaré en utilisant la condition de covariance.

Passé l'épisode (vers 1906) des expériences de Kaufmann, où les hésitations de Poincaré reflètent sa conception empirique initiale du principe (en relation à des expériences particulières), encore qu'elles soient accompagnées d'une mise en doute très perspicace des résultats de ces expériences⁹⁹, il affirma par la suite avec force la nécessité de ce principe. «On ne voit pas comment on pourrait renoncer au principe de relativité», écrit-il en 1912 à propos du problème des quanta: il s'agit de la diffusion de la lumière sur les molécules (pour expliquer le bleu du ciel), et de l'exigence, quand ces dernières sont en mouvement (par agitation thermique), de transformer les relations obtenues pour l'état de repos¹⁰⁰. Il continue alors d'estimer que le principe de relativité «est une convention qui nous est suggérée par l'expérience, mais que nous adoptons librement»¹⁰¹ (conception que d'ailleurs Einstein reprendra pour son compte, en fondant cette «liberté» notamment sur l'enseignement de Poincaré, sans toutefois partager son conventionnalisme).

PRINCIPE DE RELATIVITÉ PHYSIQUE ET PRINCIPE DE RELATIVITÉ DE L'ESPACE

⁹⁸ «Trop d'expériences diverses ont donné des résultats concordants pour qu'on ne se sente pas tenté d'attribuer à ce principe de relativité une valeur comparable à celle du principe d'équivalence, par exemple» (Poincaré [1908b]).

⁹⁹ Ces expériences semblaient infirmer la formule de variation relativiste de la masse de l'électron, et infirmer aussi bien la théorie de Lorentz et Poincaré que celle d'Einstein. S'interrogeant sur ce résultat, Poincaré considérait l'éventualité d'une mise en défaut du principe de relativité : «Le principe de relativité n'aurait donc pas la valeur rigoureuse qu'on était tenté de lui attribuer» (Poincaré [1908b]). Nous ne pouvons nous étendre ici sur ce point. Sur les expériences de Kaufmann (en particulier Kaufmann [1906]), voir Hon [1985]. Sur les réactions contrastées de Poincaré et d'Einstein en ce qui concerne la validité du principe de relativité - et dont cependant, les critiques sur le dispositif expérimental furent très voisines, interrogeant l'uniformité du champ électrique employé (sur celle de Poincaré, voir Poincaré [1908b]) -, cf. Paty [1993], p. 443.

¹⁰⁰ «Les rapports entre la matière et l'éther», publié dans *Dernières pensées* (Poincaré [1913], p. 219).

¹⁰¹ Dans l'article «L'espace et le temps» (Poincaré [1912b]), publié dans *Dernières pensées*, p. 53).

Il est utile de revenir sur un aspect de la pensée de Poincaré concernant le principe de relativité qui apparaît décisif à plusieurs égards: le lien du principe de relativité physique et au principe de relativité de l'espace. On pourrait concevoir a priori que le premier concerne la physique et le second la géométrie, et que l'affirmation par Poincaré de ce lien impliquerait un rapport direct entre la question de la relativité en physique et la question de la nature de la géométrie. Mais il n'en est rien si nous nous souvenons de sa manière de concevoir l'espace et la géométrie.

Pour Poincaré, ce sont les corps qui nous permettent de concevoir l'espace, dont l'idée se forme à partir de l'expérience que nous faisons - par les mouvements de notre propre corps et nos sensations - de leurs déplacements. L'entendement construit ensuite l'espace abstrait de la géométrie. Mais l'objet de la géométrie n'est pas cet espace qui, considéré en dehors des corps qu'il contient, n'a pas de propriété qui lui soit propre. L'objet de la géométrie, c'est le groupe des déplacements des corps solides naturels (idéalisés) dans l'espace.

L'espace selon Poincaré est «amorphe» et «malléable»¹⁰². C'est un caractère que la présence d'objets ne modifie pas: «il peut s'appliquer à tout; il n'a pas de propriétés à lui». Cette remarque consonne par certain côté avec le «mollusque de référence» de la Relativité générale d'Einstein¹⁰³: mais au-delà de la similitude de vocabulaire, les contenus diffèrent singulièrement. L'espace «amorphe» de Poincaré est sans forme et sans consistance tant qu'on n'y considère pas de corps, tandis que le «mollusque» d'Einstein est une forme ajustable aux objets qu'il contient. Ils ont cependant en commun d'être «malléables», et ce n'est pas sans importance (en relation à la portée, chez les deux, de l'utilisation d'une forme mathématique pour la physique, concernant, en l'occurrence, la métrique¹⁰⁴).

Mais la signification physique attachée à ces deux qualifications reste très différente, en raison de leurs points de vue respectifs sur les médiations qui opèrent entre l'espace et les corps. Pour Einstein, la relation entre l'espace et les corps, si elle est la même que pour Poincaré quant à l'origine du concept d'espace dans notre expérience, en diffère quant à sa nature: l'espace de la géométrie, constitué à partir des corps en entité abstraite, leur est ensuite appliqué moyennant des relations de coordination faisant correspondre, aux grandeurs spatiales (coordonnées et distances) de la géométrie pure, des quantités physiques. On construit de la sorte, à partir des corps, un «espace physique de référence», qui est proprement l'objet d'une «géométrie physique» ou «géométrie pratique».

Si le principe de relativité physique a, pour Poincaré, à voir avec le

¹⁰² Poincaré [1907], [1912b].

¹⁰³ Einstein [1917a].

¹⁰⁴ On pourrait approfondir la comparaison en analysant la signification du mot «forme», dans l'expression «forme mathématique» et dans les considérations sur l'espace, respectivement chez Poincaré et chez Einstein. Cette analyse est implicite dans les considérations qui suivent.

principe de relativité de l'espace, on doit donc l'entendre d'une manière distincte de son rapport à la géométrie. Cela ne signifie pas, pour autant, que, dans sa pensée, le principe de relativité soit détaché de la question de la géométrie. Mais s'il existe entre eux un rapport, il est indirect - du moins, à s'en tenir à sa pensée de la géométrie telle qu'il l'a exprimée dans ses grands textes «classiques». Et, de fait, il existe un lien, dans sa pensée, entre sa conception du principe de relativité pour l'électrodynamique des corps en mouvement et sa conception de nature de la géométrie, selon laquelle les diverses géométries (euclidienne et non-euclidiennes) sont équivalentes en ce qui concerne leur rapport au monde physique. Ce lien n'est pas explicite dans ses travaux en électrodynamique, y compris celui de 1905, ni dans ses réflexions sur la géométrie ou sur la physique, et il ne pouvait l'être, pour la raison qu'on vient de dire, mais il se révèle à l'analyse dans ses conceptions, à travers ses recherches sur la dynamique relativiste comme dans son interprétation de l'espace et du temps transformés des systèmes en mouvement relatif. Plus exactement, ce lien se manifeste dans la forme de pensée de Poincaré: il conçoit le principe de relativité et ses implications pour les systèmes physiques sur le même mode dont il envisage l'existence d'une pluralité de géométries. Ses considérations sur les deux sujets appellent souvent le parallèle¹⁰⁵.

C'est donc par un autre biais que nous devons aborder la question du rapport du principe de relativité physique à celui de l'espace: par celui, direct, que Poincaré lui-même nous indique, et qui fait intervenir la considération des corps, ou des instruments - mais c'est, pour Poincaré, une seule et même chose: on en revient toujours, en matière d'espace, aux instruments, c'est-à-dire, en définitive, aux corps.

Cela étant, la question qui se pose est de savoir si l'établissement du principe de relativité au sens de l'électrodynamique entraîne des modifications, et lesquelles, dans la conception que Poincaré se fait de ce rapport. Plusieurs textes postérieurs à 1905, parmi lesquels celui de 1907 sur «La relativité de l'espace» et celui de 1912 sur «L'espace et le temps», sont extrêmement intéressants à cet égard, complétant ou révisant (sans nécessairement que ce soit clairement indiqué) les interprétations antérieures. D'ailleurs, ces textes comportent aussi des éléments qui rendent plus évident le lien de ces problèmes à ceux de la géométrie, confirmant l'idée que nous avons émise à propos de ses conceptions telles qu'elles se manifestent dans son travail théorique lui-même.

Pour Poincaré, le principe de relativité des mouvements n'est autre que l'une des formes de la relativité de l'espace. Et, de fait, il a toujours abordé le problème de la relativité des mouvements en physique, que ce soit pour la mécanique ou pour les autres phénomènes, optiques ou électromagnétiques, à partir de la question de la relativité de l'espace. C'est ainsi, par exemple, qu'il écrit, vers 1900, à propos de la théorie de Lorentz et des expériences d'optique au

¹⁰⁵ Nous en avons fait l'analyse dans Paty [1992a] et [1993a], chapitre 6.

premier ordre: «Les phénomènes dont un système [électrodynamique] est le siège semblaient devoir dépendre de la vitesse absolue de *translation* du centre de gravité de ce système, ce qui est contraire à l'idée que nous nous faisons de la *relativité de l'espace*»¹⁰⁶.

Par principe de la relativité de l'espace, Poincaré entend cette propriété de la mécanique que les états des corps d'un système matériel, leurs distances mutuelles et leurs vitesses relatives ne dépendent, à un instant donné, que des états, des distances mutuelles et des vitesses relatifs à l'état initial, et non des positions, des orientations et des vitesses absolues initiales du système¹⁰⁷. (Notons que, dès lors, la relativité de l'espace entraîne la relativité par rapport aux mouvements quelconques). La relativité de l'espace peut prendre trois formes: celle d'un simple changement de lieu ou translation, celle d'un changement de dimensions par similitude homothétique, ou encore celle d'un changement de dimension des corps de nature physique.

Le texte «La relativité de l'espace», de 1907¹⁰⁸, revient avec précision sur ces différentes formes, éclairant le sens profond que revêt, pour Poincaré, par rapport à la relativité de l'espace, la relativité de la dynamique électromagnétique. L'enjeu, au terme, semble bien être de savoir si l'électrodynamique a enfin rejoint ce que Poincaré appelle la «physique mathématique», physique des équations différentielles et devant, comme telle, satisfaire à la relativité de l'espace.

La relativité de l'espace sous la première forme, c'est-à-dire dans le sens banal, rappelle-t-il, veut que ce ne soit pas par rapport à l'espace comme entité absolue que l'on énonce des propositions sur des positions ou des distances, mais par rapport à des corps qui occupent un espace relatif. Sous une deuxième forme, plus élaborée, on désigne une relativité de similitude au sens de la géométrie, c'est-à-dire pour des transformations homothétiques sur les dimensions ou les distances, qui doivent être considérées pour l'univers entier. Dans ces deux conceptions de la relativité de l'espace, le monde transformé est supposé rester semblable à lui-même, quant à la forme même de ses objets. Mais l'on peut encore imaginer une troisième forme, qui correspond aux transformations du groupe de Lorentz: des corps entraînés (par le mouvement de la Terre) subissent une déformation (contraction des longueurs)¹⁰⁹.

La relativité dont il s'agit alors est une relativité des vitesses¹¹⁰: on ne

¹⁰⁶ Poincaré [1902a], chap 13, sur l'électrodynamique (p. 242). La même remarque est reprise mot pour mot dans son texte de 1901, «A propos des expériences de M. Crémieux» (Poincaré [1901b]).

¹⁰⁷ Poincaré [1902a], chap. 5.

¹⁰⁸ Poincaré [1907].

¹⁰⁹ *Ibid.* Rappelons que cette déformation est, pour Poincaré, de nature dynamique, due aux forces électromagnétiques ou à des forces analogues.

¹¹⁰ Avec la relativité des longueurs, accordée par la relativité de l'espace dans les deux premiers sens examinés, on peut encore en rester dans le domaine de la géométrie. La relativité physique du troisième sens fait intervenir le temps et la vitesse, qui ne sont pas géométriques mais physiques. A cet égard, la relativité de Lorentz ne fait que prolonger la relativité de la mécanique, dont le

peut connaître la «véritable vitesse». Poincaré précise, dans ce texte de 1907, qu'il entend par là, non pas la vitesse absolue - notion qui n'a aucun sens, comme l'espace absolu -, mais la «vitesse par rapport à l'éther»¹¹¹. (Une telle distinction suppose implicitement l'assimilation de l'éther électromagnétique à une sorte de corps. Mais, quelques années plus tard, en 1912, Poincaré doutera que cette distinction aît une signification, ce qui est à mettre au compte d'une évolution de sa pensée concernant l'éther, l'espace et le temps¹¹²) Dans la relativité sous cette troisième forme - dynamique -, on ne peut pas mettre en évidence la déformation associée à la transformation considérée, car l'unité de longueur dans le sens du mouvement est déformée de la même façon. La raison en est que, dans la transformation de Lorentz, la longueur est mesurée par le temps que la lumière met à la parcourir - en admettant que «la vitesse de la lumière est constante et indépendante de la direction» -, et que l'on est obligé d'admettre la déformation (la contraction) des dimensions longitudinales¹¹³. Car «si les surfaces d'onde de la lumière avaient subi les mêmes déformations que les corps matériels, nous ne nous serions pas aperçus de la déformation de Lorentz-Fitzgerald».

Nous mesurons ou déterminons les distances par le moyen d'un instrument - le mètre, ou le chemin parcouru par la lumière -, en sorte que «si le rapport est altéré, nous n'aurons aucun moyen de savoir si c'est la grandeur ou bien l'instrument qui a varié». Dans une telle déformation, «le monde n'est pas resté semblable à lui-même»: les sphères sont devenues des ellipsoïdes, etc.; «et cependant nous n'avons aucun moyen de savoir si cette déformation est réelle»¹¹⁴. En somme, la relativité dynamique de Lorentz retrouve la relativité de l'espace et celle de la mécanique parce que l'on a associé aux unités des distances spatiales celle de la vitesse de la lumière. Dès lors, elle se confond avec elles. La relativité dynamique (le «principe de relativité physique») peut donc être considérée comme une conséquence de la relativité de l'espace.

Il est d'ailleurs possible de généraliser: le groupe des transformations de Lorentz n'est qu'un exemple de relativité dynamique. Poincaré indique, dans

rapport à la relativité de l'espace implique les principes de la mécanique.

¹¹¹ Il précise, dans le texte à peu près contemporain «La dynamique de l'électron» (Poincaré [1908b]), que le principe de relativité concerne les vitesses relatives des corps les uns par rapport aux autres. «... Il est impossible d'échapper à cette impression que le principe de relativité est une loi générale de la Nature, qu'on ne pourra jamais par aucun moyen imaginable mettre en évidence que des vitesses relatives, et j'entends par là *non pas seulement les vitesses des corps par rapport à l'éther, mais les vitesses des corps les uns par rapport aux autres*» (souligné par moi, M.P.).

¹¹² Poincaré [1912b]. Sur cette évolution, voir plus loin.

¹¹³ Poincaré [1907]. Poincaré a exprimé ailleurs l'idée que la contraction de Lorentz-FitzGerald «n'est que la traduction immédiate du résultat de Michelson, si l'on *définit* les longueurs par les temps que la lumière met à les parcourir» (Poincaré [1908b], souligné par H.P.). On ne se rend plus compte, dès lors, d'une déformation entre le repos et le mouvement. Si l'on utilisait des mètres pour mesurer les longueurs, on s'apercevrait au contraire de la différence, puisqu'ils seraient contractés dans le sens de la longueur (*ibid.*).

¹¹⁴ Poincaré [1907].

ce texte de 1907, que l'on peut même concevoir un changement déterminé quelconque de la forme des corps, qui correspond à une transformation quelconque des coordonnées¹¹⁵. Il reprendra cette considération dans son article de 1912 sur l'espace et le temps¹¹⁶. Mais il ne s'est pas interrogé davantage sur les implications d'une telle propriété. Einstein ne se poserait, quant à lui, le problème de cette manière qu'au terme d'un approfondissement de la question d'une généralisation du principe de relativité au-delà du mouvement d'inertie, qui lui ferait admettre comme fondamentale physiquement la considération formelle des transformations générales des coordonnées, à travers une réflexion sur la signification de l'idée de covariance physique¹¹⁷.

Revenant sur ces questions dans l'article «L'espace et le temps», de 1912¹¹⁸, Poincaré fait valoir que l'idée de relativité de l'espace et du temps implique celle de lois pour le monde dans son entier - autrement dit, l'idée cosmologique -, puisque toutes les parties du monde sont en dépendance l'une de l'autre. Le principe de relativité ne s'applique qu'aux équations différentielles, et non aux équations finies, qui supposent des constantes d'intégration et sont donc sensibles à des changements d'axes. Mais «si on veut que les équations différentielles qui régissent le monde soient exactes, elles devront être le système unique d'équations différentielles qui s'appliquera à tout l'univers». A quoi il ajoute: «Or, si nous n'avons qu'un seul système de lois s'appliquant à tout l'univers, l'observation ne nous donnera qu'une solution unique, celle qui est réalisée; car l'univers n'est tiré qu'à un seul exemplaire»¹¹⁹.

Chez Poincaré, la relativité de l'espace est donnée en premier lieu par la manière même dont la notion d'espace s'est constituée, à partir de l'expérience des mouvements des corps: elle est, à ce titre, le «principe de relativité psychologique» ce qui, dans sa terminologie, signifie celui de notre expérience sensorielle de l'espace. Toutefois, ce principe se distingue de celui qui concerne l'espace construit par l'entendement, l'espace de la géométrie, dont la description qu'il donnée de sa genèse est bien connue¹²⁰. Dans la mesure où la construction de l'espace de la géométrie fait intervenir la considération des corps solides, le principe de relativité de l'espace est tributaire de propriétés empiriques, celles que l'on attribue à ces corps, à leurs mouvements, et devient un principe de relativité physique. Poincaré insiste, dans «L'espace et le temps», sur cette distinction entre une relativité psychologique et une relativité physique, et c'est clairement à cette dernière qu'il renvoie la relativité de l'espace.

115 *Ibid.*

116 Poincaré [1912b]. Je reviendrai sur cette question dans un travail à paraître ultérieurement (Paty [en prép. 2]).

117 Voir Paty [1993a], chapitre 5.

118 Poincaré [1912b].

119 *Ibid.*

120 Poincaré [1895a], repris dans [1902a], chap. 4; ainsi que [1903a], dans [1905a], chap. 5. Cf. Paty [1993a], chap. 6. Voir plus haut.

Le principe de relativité de l'espace ne se tient plus dès lors seulement entre la convention de définition (qui constitue ensemble l'espace et la géométrie) et la tautologie (quand on le rapporte à l'univers entier): dans la mesure où il est physique, il comporte une part factuelle. Cette «vérité expérimentale» qu'il exprime, c'est que l'action mutuelle de deux corps tend vers zéro quand ces corps s'éloignent indéfiniment; il signifie, dans ce sens, «que deux mondes éloignés se comportent comme s'ils étaient indépendants». Le principe de relativité physique, souligne Poincaré, «n'est pas une nécessité due à la nature même de notre esprit, c'est une vérité expérimentale à laquelle l'expérience impose des limites», c'«est un fait expérimental, au même titre que les propriétés des solides naturels». Dans la mesure où il n'est pas une simple convention, mais où il est vérifiable, «il est susceptible d'une incessante révision».

Cet état de chose, qui caractérise le statut du principe de relativité physique, s'applique aussi bien à la physique qui considère les seules propriétés des solides qu'à la dynamique électromagnétique, ou même à une dynamique quelconque représentée par les transformations les plus générales.

Ces précisions s'accompagnent d'une considération qui peut apparaître nouvelle concernant le concept d'espace et la géométrie, bien que Poincaré la situe dans une continuité logique avec sa conception de la construction de l'espace à partir des propriétés des corps solides. De même, indique-t-il, que l'on peut construire l'espace à partir du groupe des déplacements des corps solides (objet de la géométrie), on peut le construire à partir du groupe des transformations qui n'altèrent pas nos équations différentielles (on peut définir sur cette base l'égalité de deux figures de systèmes mécaniques). Cette deuxième manière de voir n'est pas très différente de la première, mais elle permet une généralisation, des corps solides indéformables aux systèmes physiques soumis à des lois définies de déformation. On se donne, par une telle convention, une nouvelle définition de l'espace; cette définition concerne d'ailleurs aussi le temps¹²¹.

La relativité de l'espace entraîne la relativité par rapport aux mouvements quelconques, écrivait-il dans *La science et l'hypothèse*¹²². Inversement, note-t-il en 1912, il est possible de construire un espace, et donc une géométrie, mais également un temps, qui soient déterminés par le principe de relativité impliqué par la dynamique électromagnétique (transformations de Lorentz), voire par un principe de relativité concernant les mouvements quelconques. La nouveauté est que Poincaré admet ici que l'on peut définir et l'espace et le temps à partir du choix d'un principe de relativité physique - et par là même de construire une géométrie appropriée à ce choix. Cette conception nous rapproche quelque peu du programme de la relativité restreinte - puis

¹²¹ Poincaré [1912b], p. 49-51. «La convention nouvelle ne définit pas seulement l'espace, elle définit le temps».

¹²² Voir plus haut.

générale - au sens d'Einstein¹²³.

Pour autant, Poincaré n'abandonne pas ses conceptions épistémologiques sur le statut du principe ni sur celui de la géométrie: elles le guident au contraire vers une assimilation de l'extension du principe aux transformations physiques choisies, tout en restant dans le cadre de son interprétation habituelle. Il s'interroge, dans le texte de 1912, à propos de la mécanique nouvelle - c'est-à-dire de la relativité restreinte - sur le point de savoir si ses considérations antérieures à propos de la géométrie ne doivent pas être révisées, puisque la convention par laquelle on définit l'espace doit être modifiée en tenant compte de la dynamique (les transformations de Lorentz étant, pour lui, de nature dynamique). Le principe de relativité physique, étant expérimental, est sujet à révision. La géométrie peut être construite à partir de lui ; or, elle doit échapper à cette révision. Il faut qu'elle redevienne une convention et que, pour cela, le principe de relativité lui-même soit regardé comme étant également une convention. Or, cela reste possible, la part expérimentale du principe ne pouvant être l'objet que d'une vérification approximative: elle se rapporte à une action nulle à l'infini entre deux systèmes, que nous pouvons admettre dans l'absolu si nous le voulons.

Dès lors, le principe de relativité physique «est une convention qui nous est suggérée par l'expérience, mais que nous adoptons librement»¹²⁴. Poincaré parvient ainsi à harmoniser la part de convention et la part empirique dans la détermination du principe. C'est cette même harmonisation qu'Einstein exprime de son côté, d'abord dans son épistémologie pratique mise en oeuvre dans ses travaux sur la relativité restreinte et la relativité générale, puis explicitée dans ses conceptions sur l'espace physique et la géométrie¹²⁵. Il est intéressant de remarquer qu'il emploiera, pour caractériser le statut du principe de relativité, comme celui des autres principes physiques, la même formulation que celle que Poincaré donne en 1912, insistant toutefois sur le caractère particulier de la liberté par laquelle nous adoptons une telle convention «suggérée par l'expérience» : c'est une «liberté logique» au sens de la critique (humienne) de l'induction. L'expérience y est malgré tout plus contraignante que pour la convention au sens de Poincaré, dans le sens d'une exigence plus univoque de conformité à la réalité physique¹²⁶.

L'ÉVOLUTION DES IDÉES DE POINCARÉ

¹²³ Voir Paty [1994].

¹²⁴ Poincaré [1912b], p. 51-52.

¹²⁵ Cf. Paty [1993a], chap. 7.

¹²⁶ Cf. Paty [1993a], chap. 9.

SUR LA RELATIVITÉ APRES 1905

On considère généralement que Poincaré a opposé une fin de non-recevoir à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, malgré - ou à cause de - la grande proximité de leurs résultats. **On a longtemps prétendu qu'Einstein lui-même s'en serait plaint (ce que rien toutefois ne prouve)**¹²⁷ ; il reste que Poincaré n'a mentionné son nom, dans ses écrits publiés, qu'à propos des quanta d'énergie, en 1912¹²⁸. Les deux savants se rencontrèrent une fois, au Conseil Solvay de 1911¹²⁹. On sait aussi que Poincaré faisait grand cas d'Einstein comme physicien, comme en témoigne une lettre de recommandation adressée à Pierre Weiss, dans laquelle il loue le jeune savant comme «l'un des esprits les plus originaux que j'ai connus», tout en considérant que certaines de ses directions de recherche mèneraient probablement à des impasses, ce qui est normal car «il cherche dans toutes les directions»¹³⁰.

La vérité est peut-être plus complexe, et il est possible que la relativité au sens d'Einstein l'ait davantage intéressé qu'on ne l'a dit. Du côté des témoignages, on relèvera un souvenir de l'homme de lettres Alexander Moszkowski, auteur d'un volume de *Conversations avec Einstein*, paru en 1921, dans lequel il déclare avoir entendu pour la première fois le nom d'Einstein prononcé par Poincaré lui-même au cours d'une conférence sur «La mécanique nouvelle» que ce dernier donna dans la capitale allemande le 13 octobre 1910¹³¹. Ce fut apparemment en termes positifs, puisque l'auteur avoue avoir depuis lors

¹²⁷ La déclaration d'Einstein invoquée est la suivante : [Vis-à-vis de la théorie de la relativité] «Poincaré affichait tout simplement une attitude de refus et faisait preuve, malgré toute sa perspicacité, de peu de compréhension pour la situation» (Einstein, Lettre à Zangger, 16 nov. 1911, citée par Kahan [1959] et par Miller [1981], p. 255). Cf. Paty [1987], p. 121-122. **Remarque, ajoutée en 2004 : En fait il ne s'agit pas de la théorie de la relativité, mais de la toute nouvelle physique quantique Voir Paty [2000]. Paty, Michel [2000]. Cosmologie et matière quantique, *Epistémologiques, philosophie, sciences, histoire. Philosophy, science, history* (Paris, São Paulo) 1, n°1-2, janvier-juin 2000, 219-249. (in Seidengart, Jean et Szczeciniarz, Jean-Jacques (éds.), *Cosmologie et philosophie. Hommage à Jacques Merleau-Ponty*, numéro spécial.) Voir aussi (remarque ajoutée en 2002) : Paty [2002c], Poincaré, Langevin et Einstein, *Epistémologiques. Philosophie, sciences, histoire. Philosophy, science, history* (Paris, São Paulo) 2, n°1-2, janvier-juin 2002, 33-73.**

¹²⁸ Poincaré [1912a], dans Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 680.

¹²⁹ Langevin et de Broglie [1912].

¹³⁰ Poincaré, Lettre à Pierre Weiss, nov. 1911.

¹³¹ Moszkowski [1921], chap. 1. Moszkowski fournit cette précision que Poincaré donna sa conférence dans les salles de l'Institut Urania, à l'invitation de l'Association scientifique berlinoise. Le texte de cette conférence a été publié dans une traduction allemande «d'après le manuscrit de l'auteur» par P. Schwann (Poincaré [1910c]). Il diffère sensiblement des autres conférences de Poincaré ayant le même titre, dans la forme mais non par le contenu. Toutefois, le nom d'Einstein n'y figure pas. Poincaré l'aura peut-être mentionné au cours de sa conférence, ou dans la discussion qui aura suivi.

rêvé de rencontrer Einstein, jusqu'à ces entretiens de 1919 et 1920. On peut également s'interroger sur une éventuelle évolution des idées de Poincaré après 1905 dans un sens plus proche de celui d'Einstein, voire sur une certaine influence du point de vue de ce dernier sur sa propre manière de concevoir la théorie et son interprétation.

De toute façon, même si Poincaré a pu mentionner oralement le nom d'Einstein à propos de la relativité, la «mécanique nouvelle» est toujours restée pour lui celle «de Lorentz», dont il a lui-même perfectionné la formulation. Sa conception est fondamentalement restée celle d'une *dynamique*, et non d'une *cinématique* relativiste. Mais cela n'exclut cependant pas qu'il ait pu devenir au cours des années plus attentif à certains aspects soulignés par Einstein, comme ont pu l'être d'autres chercheurs qui lui étaient plus proches comme, par exemple, Hermann Minkowski et Paul Langevin. On sait que ces derniers ont développé les implications de l'espace-temps relativiste dans le sens des conceptions d'Einstein, tout en participant - davantage encore que Poincaré lui-même - de la «conception électromagnétique du monde» et en valorisant, pour cette raison, la part de la dynamique comme inhérente à la reformulation de l'espace et du temps¹³².

Lorsque Poincaré parle, dans plusieurs de ses textes postérieurs à 1905, tel «L'espace et le temps», de 1912¹³³, de la «révolution qui est liée aux récents progrès de la physique», il a en vue la substitution du principe de relativité sous sa forme ancienne par celui de Lorentz. Il précise, en effet : «Ce sont les transformations du 'groupe de Lorentz' qui n'altèrent pas les équations différentielles de la Dynamique». Il en résulte, ajoute-t-il, que pour deux systèmes en translation relative, «non seulement telle figure, que le premier regarde comme une sphère, apparaîtra au second comme un ellipsoïde; mais deux événements que le premier regardera comme simultanés ne le seront plus pour le second»¹³⁴. On relèvera l'insistance sur la question de la simultanéité, qui, certes, ne lui avait pas été étrangère, mais qui semble être ici d'autant plus valorisée qu'il est question, dans l'article, de l'espace et du temps en eux-mêmes, d'ailleurs liés, pour la première fois de manière explicite sous sa plume, en un espace-temps. Comme effet de «la révolution qui s'est récemment accomplie dans nos idées sur la mécanique», se demande-t-il, «le *principe de relativité* tel que le conçoit M. Lorentz ne va-t-il pas nous imposer une conception entièrement nouvelle de l'espace et du temps et par là nous forcer à abandonner des conclusions qui pouvaient sembler acquises ?»¹³⁵

Si l'espace et le temps de l'électrodynamique sont modifiés par

¹³² Minkowski [1907], [1908a], [1908b], Langevin [1911 a et b]. Cf. Paty [1977] et [1993a], chap. 4.

¹³³ Poincaré [1912b].

¹³⁴ Poincaré [1912b], p. 53.

¹³⁵ Poincaré [1912b], p. 35. Souligné par moi (M.P.). Voir également plus haut (à la section précédente), à propos de ses considérations de 1912 sur la relation entre le principe de relativité physique, l'espace et la géométrie.

rapport à ceux de la mécanique classique, Poincaré ne les avait jamais jusqu'alors conçus comme un même entité : son innovation du temps comme quatrième coordonnée était restée, dans son travail de 1905, une commodité mathématique. Or, voici qu'il insiste désormais sur leur lien de structure. Il écrit, en effet, à propos du «temps (...) quatrième dimension de l'espace»: «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»¹³⁶. Il fait ensuite allusion à la *région espace* (a-causale) de l'espace-temps d'une manière qui montre clairement ce qu'elle doit à l'interprétation de Minkowski¹³⁷ et comment elle va au-delà de ce qu'il avait pu dire lui-même auparavant¹³⁸.

«Aujourd'hui certains physiciens veulent adopter une convention nouvelle» (pour cet espace-temps), remarque-t-il, tout en faisant observer, dans l'esprit de sa philosophie des concepts, des principes, mais aussi de la géométrie, qu'ils n'y sont pas contraints, et que cette définition est seulement plus commode.

Cet espace-temps, avec les «définitions» qui le constituent, n'est autre que celui de la relativité au sens d'Einstein, reformulé peu auparavant par Minkowski - à l'aide de la notation de Poincaré pour la quatrième coordonnée -, et commenté également par Langevin, qui fut son élève et avec lequel Poincaré était en étroites relations. (Ajoutons que Poincaré avait participé au même Congrès de philosophie de Bologne, en 1911, où Langevin exposa son analyse physique de l'espace-temps de la relativité¹³⁹). Les «physiciens» qui prônent la nouvelle manière de voir sont les physiciens relativistes, et comprennent, outre ceux mentionnés, Einstein lui-même, Max von Laüe, Max Planck, Arnold Sommerfeld et quelques autres dont Poincaré n'ignorait certainement pas les travaux. Poincaré ne s'identifie pas à eux, et ne leur identifie pas non plus Lorentz, plus réticent encore que lui à la formulation einsteinienne. Ces «relativistes» voyaient, pour leur part, comme on le sait, davantage qu'une simple convention dans le choix des nouveaux concepts.

En 1908 déjà, dans un article sur «La dynamique de l'électron» dans lequel il reprenait les résultats du travail presque homonyme de 1905, Poincaré

¹³⁶ Poincaré [1912b], p. 53. Poincaré n'emploie toutefois pas l'expression «espace-temps».

¹³⁷ Bien qu'il ne mentionne pas son nom.

¹³⁸ «J'ai cherché autrefois à définir le rapport de deux événements survenus dans deux théâtres différents en disant que l'un sera regardé comme antérieur à l'autre s'il peut être considéré comme la cause de l'autre. Cette définition devient insuffisante». La vitesse de la lumière étant la vitesse maximale de transmission d'effets, «il peut arriver que l'événement *A* ne puisse être (*en vertu de la seule considération de l'espace et du temps*) ni l'effet ni la cause de l'événement *B*, si la distance des lieux où ils se produisent est telle que la lumière ne puisse se transporter en temps utile ni du lieu de *B* au lieu de *A*, ni du lieu de *A* au lieu de *B*.» (Poincaré [1912b], p. 54. Souligné par moi, M.P.).

¹³⁹ Langevin [1911a]. Poincaré y présenta lui-même un exposé sur «L'évolution des lois» (Poincaré [1911c]).

s'était préoccupé, dans un paragraphe sur le principe de relativité, de la considération détaillée du temps local et de sa différence avec le temps habituel (celui où l'on omet de considérer que les horloges sont en mouvement relatif). Il explicitait la définition du temps par le réglage des horloges avec envoi et réception de signaux, considérant des signaux croisés, et postulant, dans le cas du repos, une même vitesse d'aller et de retour, comme Einstein l'avait fait, puis évaluant le retard pris dans le cas d'un système en mouvement, le long de l'un des chemins¹⁴⁰. Cette analyse de la notion de temps, plus complète que celles qu'il avait données auparavant, est plus proche de celle d'Einstein que de ces dernières. Poincaré insiste cependant - car c'est là sa préoccupation majeure en matière de *relativité* - sur le fait que des observateurs en mouvement ne s'apercevront pas de leur retard ou de leur avance réciproque, leurs horloges ne leur indiquant que le temps local de leur propre système. Les jugements de simultanéité ne sont plus universels, mais il en minimise l'importance: «Le phénomène que chacun d'eux observera sera soit en avance, soit en retard; il ne se produira pas au même moment que si la translation n'existait pas; mais, *comme on l'observera avec une montre mal réglée*, on ne s'en apercevra pas, et les apparences ne seront pas altérées»¹⁴¹. La question du réglage, c'est-à-dire la convention adoptée, guide le jugement sur l'absence d'absolu (temps, simultanéité) et tempère le constat du relatif. Le parallèle avec les conceptions de Poincaré sur l'existence de plusieurs géométries en relation au monde physique s'impose ici à l'évidence¹⁴².

Revenons un instant sur la question de la redéfinition de l'espace-temps relativiste à partir du principe de relativité physique et posée en termes de géométrie, telle que Poincaré l'évoque en 1912. «Les expériences sur lesquelles est fondée la mécanique nouvelle ne semblent-elles pas avoir (...) ébranlé [la géométrie]», se demande-t-il, alors que celle-ci était supposée hors d'atteinte de l'expérience ?¹⁴³ On observera que c'est à propos de la relativité restreinte que Poincaré envisage une modification de la géométrie (Einstein le fera seulement à propos de la relativité générale). On pourra voir deux raisons conjointes à cela: d'une part, la métrique de l'espace-temps n'est pas définie positive comme la métrique euclidienne (Minkowski avait déjà fait remarquer que l'espace-temps n'est pas euclidien, mais pseudo-euclidien); d'autre part, les corps solides (sur lesquels nous formons notre idée de la géométrie) ne sont plus invariables (une sphère devient ellipsoïde).

Enfin, quand il évoque, dans son article de 1912 «Sur la théorie des quanta», «la Mécanique nouvelle *fondée sur* le principe de relativité»¹⁴⁴, on a l'impression que Poincaré adopte un point de vue proche de celui d'Einstein quant à la structure de la théorie: c'est le principe de relativité qui la règle. Dans un

¹⁴⁰ Poincaré [1908b], p. 564.

¹⁴¹ Poincaré [1908b], p. 564. Souligné par moi (M.P.)

¹⁴² Voir plus haut. Cf. Paty [1992a] et [1993a].

¹⁴³ Poincaré [1912b]. Voir la section précédente.

¹⁴⁴ Poincaré [1912c]. Souligné par moi (M.P.).

autre texte de la même année, également sur les quanta, il évoque le récent Conseil Solvay réuni à Bruxelles, où la nouvelle «mécanique nouvelle» fut opposée par les participants à la «mécanique ancienne»; cette dernière n'est pas celle de Newton, mais «celle de Lorentz, celle du principe de relativité, celle qui, il y a cinq ans à peine, paraissait le comble de la hardiesse»¹⁴⁵, et qui, en vérité, paraît bien être, telle qu'il l'évoque, indissociablement celle «de Lorentz» (**de Lorentz-Poincaré mais Poincaré, dans sa modestie ou sa générosité, n'ajoute jamais son propre nom**), et celle d'Einstein.

«On ne se demande plus», indique-t-il, «si les équations différentielles de la Dynamique doivent être modifiées, mais si les lois du mouvement peuvent encore être exprimées par des équations différentielles»¹⁴⁶. Du moins était-ce, ici encore, une occasion de convergence entre la pensée de Poincaré et celle d'Einstein, qui avait fait valoir la nécessité de changements théoriques radicaux concernant les phénomènes quantiques dont la discontinuité défiait le caractère continu des théories en vigueur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABRAHAM, Henri et LANGEVIN, Paul [1905]. *Les quantités élémentaires d'électricité: ions, électrons, corpuscules*, Gauthier-Villars, Paris, 2 vols., 1905.

ABRAHAM, Max [1902]. *Dynamik des Elektrons*, *Nachrichten von der königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*,. Trad. fr. par P. Langevin, Principes de la dynamique de l'électron, dans Abraham et Langevin [1905], p. 1-48.

ARAGO, François [1810]. Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut, le 10 décembre 1810, *Compte rendus des séances de l'Académie des sciences* (Paris), 36,1853, 38-49.

- [1854-1857]. *Astronomie populaire*, publiée sous la dir. de J.A. Barral, 4 vols, Gide et Baudry, Paris/ Weigel, Leipzig, 1854-1857.

BOI, Luciano; FLAMENT, Dominique et SALANSKI, Jean-Michel (eds.) [1992]. *1830-1930: A century of geometry. Epistemology, history and mathematics*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.

BÜCHERER, Alfred [1904]. *Mathematische Einführung und die Elektrontheorie*,

¹⁴⁵ Poincaré [1912f], p. 654.

¹⁴⁶ Poincaré [1912f], p. 654-655. C'est dans l'article sur «Les rapports de la matière et de l'éther (Poincaré [1912a, p. 680]), que Poincaré mentionne le nom d'Einstein à propos de l'explication théorique de l'effet photoélectrique.

Teubner, Leipzig, 1904.

EINSTEIN, Albert [1905]. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-921.

- [1907f]. Ueber das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrbuch der Radioaktivität*, IV, 1907, 411-462 ; V, 1908, 98-99 (Berichtigungen, errata).

- [1916b]. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, ser. 4, XLIX, 1916, 769-822.

- [1917a]. *Ueber die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Gemeinverständlich*, Vieweg, Braunschweig, 1917. Tr. fr. par Maurice Solovine, *La théorie de la relativité restreinte et générale*, Gauthier-Villars, Paris, 1954 (trad. sur la 14^{ème} éd. allemande, avec les appendices); rééd. 1969.

- [1921a]. *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, Vieweg, Braunschweig, 1922. Trad. angl., par Edwin Plimpton Adams, *The Meaning of relativity: four lectures delivered at Princeton University*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1922. Ré-éd. augm., Princeton University Press, 1955.

- [1921d]. Geometrie und Erfahrung, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1921, part 1, 123-130. Trad. fr. in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 70-81.

- [1987-1989]. *The collected papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987, vols 1, 1987; vol. 2, 1989.

- [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, trad. fr., Seuil/éd. du CNRS, Paris, 6 vols., 1989-1993.

- , LORENTZ, Hendryk A., et MINKOWSKI, Hermann [1913h]. *Der Relativitätsprinzip*, 1913. [édition préparée et présentée par Arnold Sommerfeld]. [Ed augm., cf. Einstein *et al.* [1922], et trad. en anglais, cf. Einstein *et al.* [1923].]

- , LORENTZ, Hendryk Antoon, MINKOWSKI, Hermann, WEYL, Hermann [1922]. *Das relativitätsprinzip*, 4^{ème} éd., Teubner, Leipzig, 1922.

- , LORENTZ, Hendryk Antoon, MINKOWSKI, Hermann, WEYL, Hermann [1923]. *The principle of relativity*, with notes by Arnold Sommerfeld, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923; ré-éd., Dover, New York, 1952.

- et BESSO, Michele [1972a]. *Correspondance 1903-1955*, publiée par Pierre Speziali, Hermann, Paris, 1972.

FITZGERALD, George Francis [1882]. On electromagnetic effects due to the motion of the earth, *Transactions of the Royal Dublin Society* 1, 1882, 319-324.

FIZEAU, Hippolyte [1851]. Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse à laquelle la lumière se propage dans leur intérieur, *Compte-rendu des séances de l'Académie des sciences* (Paris) 33, 1851, 349-355.

- [1859]. Sur une méthode propre à rechercher si l'azimut de polarisation du rayon

réfracté est influencé par le mouvement du corps réfringent, *Compte-rendu des séances de l'Académie des sciences* (Paris) 49, 1859, 717-723 [Extrait].

- [1860]. Sur une méthode propre à rechercher si l'azimut de polarisation du rayon réfracté est influencé par le mouvement du corps réfringent, *Annales de chimie et de physique*, 58, 1860, 129-163 [Texte complet].

FRESNEL, Augustin [1818]. Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique, *Annales de chimie et de physique* 58, 1818, in Fresnel [1866-1870], vol. 2, 627-636.

- [1866-1870]. *Oeuvres complètes*, 3 vols., Imprimerie impériale, Paris, 1866-1870.

GLICK, Thomas (ed.) [1987]. *The comparative reception of relativity*, Reidel, Dordrecht, 1987.

HOLTON, Gerald [1964]. Poincaré and relativity, in *Mélanges Alexandre Koyré, publiés à l'occasion de son soixante-dixième anniversaire*, Hermann, Paris.

- [1973]. *Thematic origins of scientific thought*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1973.

- [1978]. *The scientific imagination: case studies*, Cambridge University Press, Cambridge, 1978.

HON, Giora [1985]. *On the concept of experimental error*, Ph D. Thesis, London University, 1985.

KAHAN, Théo [1959]. Sur les origines de la théorie de la relativité restreinte, *Revue d'histoire des sciences* 13, 1959, 159-165.

KAUFMANN, Walter [1906]. Ueber die Konstitution des Elektrons, *Annalen der Physik* 19, 1906, 487-553; 20, 1906, 639-640.

LAGRANGE, Joseph Louis [1788]. *Mécanique analytique*, Paris, 1788; 2ème éd., 1811.

LANGEVIN, Paul [1911a]. L'évolution de l'espace et du temps, *Scientia* (Bologna) 10, 1911, 31-54 (conférence au Congrès de philosophie de Bologne, 1911). Repris dans Langevin 1923, p. 265-300.

- [1911b]. Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne, *Bulletin de la Société française de philosophie*, 12, 1911, 1-46.

- [1912a]. Les grains d'électricité et la dynamique électromagnétique (conférence à la Société française de physique, 1912), in (Collectif), *Les idées modernes sur la constitution de la matière*, Gauthier-Villars, Paris, 1913. Repris dans Langevin 1923, p. 70-170.

- [1923]. *La physique depuis vingt ans*, Doin, Paris, 1923.

LANGEVIN, Paul et de BROGLIE, Maurice (eds.) [1912]. *La théorie du rayonnement et les quanta. Communications et discussions de la réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911, sous les auspices de M.E. Solvay*,

Gauthier-Villars, Paris, 1912.

LAPLACE, Pierre Simon [1796]. *Exposition du système du monde*, Paris, 1796.

LORENTZ, Hendryk Antoon [1886]. De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux, *Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam* 2, 1886, 297 suiv. et *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* IX, 1887, 103-176. Repris in Lorentz 1935-1939, vol. 4, p. 153-214.

- [1892 a]. La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* 25, 1892, 363-553. Repris in Lorentz [1935-1939], vol. 4, p. 164-343.

- [1892 b]. The relative motion of the Earth and the Ether, *Versl. Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam) 1, 1892, 74-. Repris in Lorentz [1935-1939], vol. 4, p. 219-223.

- [1895]. *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Brill; Leiden, 1895. Egalement in Lorentz [1935-1939], vol. 5, p. 1-137. Trad. fr. d'extraits in Abraham et Langevin [1905], p. 430-476.

- [1899]. Théorie simplifiée des phénomènes électriques et optiques dans des corps en mouvement, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam) 7, 1899, 507-. Repris in Lorentz [1935-1939], vol. 5, p. 139-155.

- [1900]. Considerations on gravitation, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam) 1900 (soumis le 25 avril 1900; présenté à la séance du 31 mars 1900).

- [1904]. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam). *Proceedings of the section of science* 6, 1904, 809-831. Egalement in Lorentz [1935-1939], vol. 5, p. 172-197. Trad. fr. par Paul Langevin, Phénomènes électromagnétiques dans un système qui se meut avec une vitesse quelconque inférieure à celle de lumière, in Abraham, Langevin [1905], p. 477-495.

- [1905]. Sur la théorie des électrons, in Abraham, Langevin [1905], p. 430-477. [Texte rédigé par Lorentz pour l'ouvrage collectif, reprenant des extraits de ses travaux de 1878, 1887, 1892, 1895, les reliant entre eux et les commentant.]

- [1921]. Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique, *Acta mathematica* 38, 1921, 293-308. Repris in Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 682-695.

- [1935-1939]. *Collected papers*, Nijhoff, La Haye, 9 vols., 1935-1939.

MASCART, Eleuthère [1872]. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur, *Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 2ème série, 1, 1872, 157-214.

- [1874]. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur (deuxième partie), *Annales*

scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure, 2ème série, 3, 1874, 363-420.

- [1893]. *Traité d'optique*, 3 vols., Gauthier-Villars, Paris, 1893.

MAXWELL, James Clerk [1873]. *A treatise on electricity and magnetism* (1873); 3rd ed. (1891), 2 vols. Ré-éd., Dover, New York, 1954.

- [1890]. *The scientific papers of J.-C. M.*, Cambridge, 1890.

- [1879]. Ether, *Encyclopaedia Britannica*, 1879.

MAYRARGUE, Arnaud [1991]. *L'aberration des étoiles et l'éther de Fresnel (1729-1851)*, Thèse de doctorat en épistémologie et histoire des sciences, Université Paris-7, Paris, décembre 1991.

- [à paraître a]. Les débuts de l'optique des corps en mouvement: Bradley, Arago, Fresnel, et l'entraînement partiel de l'éther, *Revue d'Histoire des sciences* (à paraître).

- [à paraître b]. Histoire du coefficient d'entraînement de l'éther de Fresnel à Fizeau, *Revue d'Histoire des sciences* (à paraître).

MICHELSON, Albert A. [1881]. The relative motion of the earth and the luminiferous ether, *American Journal of Science*, 22, 1881, 120-129.

- and MORLEY, Edward W. [1886]. Influence of motion of the medium on the velocity of light, *American Journal of Science*, 31, 1886, 261-270.

- and MORLEY, Edward W. [1887]. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether, *American Journal of Science*, 34, 1887, 333-345.

MILLER, Arthur I. [1973]. A study of Henri Poincaré's 'Sur la dynamique de l'électron', *Archive for history of exact science* 10, 1973, 207-328. Repris in Miller [1986], p. 29-128.

- [1981]. *Albert Einstein's special theory of relativity. Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1981.

- [1984]. *Imagery in scientific thought: creating 20 th century physics*, Birkhauser, Boston, 1984.

- [1986]. *Frontiers of physics, 1900-1911: Selected Essays. With an Original Prologue and Postscript*, Birkhäuser, Boston/Basel/Stuttgart, 1986.

MINKOWSKI, Hermann [1907]. Das Relativitätsprinzip (exposé présenté à Göttingen le 5.11.1907, publication posthume, par les soins de Arnold Sommerfeld), *Annalen der Physik*, 47, 1915, 927-938.

- [1908a]. Die Grundgleichungen für die elektromagnetische Vorgänge in bewegten Körpern, *Nachrichten der Königlichen Gessellschaft der Wissenschaft und der Georg-August Universität zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse* 1908, 53-111. [Les équations fondamentales des phénomènes électromagnétiques dans les corps en mouvement].

- [1908b]. Raum und Zeit (exposé présenté à la 80 ème assemblée des scientifiques et médecins allemands, Cologne le 21.9.1908), *Physikalische*

Zeitschrift 10, 1909, 104-111. Trad. angl., Space and time, in Einstein et al. [1923], p. 73- 91.

MOSZKOWSKI, Alexander [1921]. *Conversations with Einstein*, trad. de l'allemand par Henry L. Brose, 1921. Ré-éd., Horizon Pres, New York, 1970.

PAIS, Abraham [1982]. *Subtle is the Lord. The science and life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982.

PATY, Michel [1987]. The scientific reception of relativity in France, in Glick [1987], p. 113-167.

- [1992a]. Physical Geometry and Special Relativity: Einstein and Poincaré, in Boi, Flament et Salanski [1992], p. 126-149.

- [1992 b]. L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, in Dilworth, Craig (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, 1992.

- [1993]. *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

- [1994]. Histoire du problème du temps. Le temps physique et les phénomènes, in Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Frontières, Paris, 1994, p. 21-58.

- [à paraître a]. Le coefficient de Fresnel et la vitesse de la lumière, *Revue d'histoire des sciences* (à paraître).

- [à paraître b]. Poincaré et la relativité des mouvements pour l'optique, *Revue d'histoire des sciences* (à paraître).

- [en prép. a]. L'analogie mathématique au sens de Poincaré et sa fonction en physique, en préparation.

- [en prép. b]. The generalization of the physical principle of relativity and the cosmological idea in Poincaré (La généralisation du principe de relativité physique et l'idée cosmologique chez Poincaré), en préparation.

PAULI, Wolfgang [1921]. Relativitätstheorie, in *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, vol. 5, part. 2, Teubner, Leipzig, 1921, p. 539-775; également in Pauli 1964, vol 1, p. 1-237. Engl. transl., *Theory of relativity*, Pergamon Press, Oxford and New York, 1958.

- [1958]. Supplementary notes by the author, in Pauli, W., *Theory of relativity*, trad. angl. de Pauli 1921, p. 207-232. Egalement in Pauli [1964], vol. 1, p. 238-263.

- [1964]. *Collected scientific papers*, edited by R. Kronig and V.F. Weisskopf, 2 vols., Interscience/Wiley and sons, New York, 1964.

PIETROCOLA DE OLIVEIRA, Mauricio P. [1993]. *E. Mascart et l'optique des corps en mouvement*, Thèse d'épistémologie et d'histoire des sciences, Université Paris 7, 1993.

- [à paraître]. Lumière et mouvement des corps dans les recherches de Mascart pour le Grand prix des sciences mathématiques de 1870, *Revue d'histoire des*

sciences (à paraître).

POINCARÉ, Henri [1887]. Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie, *Bulletin de la Société mathématique de France* 15, 1887, 203-206; repris dans Poincaré [1916-1965], vol.11, p. 79-91.

- [1889a]. *Leçons sur la théorie mathématique de la lumière, professées pendant le premier semestre 1887-1888*, rédigées par Jules Blondin, Cours de la Faculté des sciences de Paris, Cours de physique mathématique, Carré, Paris, 1889, 408 p. (Vol. 2: voir [1892a]).

- [1890a]. *Electricité et optique, I. Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière. Leçons professées pendant le second semestre 1888-1889* [en réalité, 1887-1888¹⁴⁷], rédigées par Jules Blondin, Cours de physique mathématique, Carré, Paris, 1890. [Voir la ré-éd. revue et augm., Poincaré [1901a)].

- [1891a]. *Electricité et optique, II. Les théories de Helmholtz et les expériences de Hertz. Leçons professées pendant le second semestre 1889-1890*, rédigées par Bernard Brunhes, Cours de physique mathématique, Carré, Paris, 1891. [Voir la ré-éd. revue et augm., Poincaré [1901a)].

- [1891b]. Les géométries non-euclidiennes, *Revue générale des sciences pures et appliquées* 2, 1891, 769-774. Repris in Poincaré [1902a] (chap. 3).

- [1892a]. *Théorie mathématique de la lumière, II. Nouvelles études sur la diffraction. Théorie de la dispersion de Helmholtz. Leçons professées pendant le premier semestre 1891-1892*, rédigées par M. Lamotte et D. Hurmuzescu, Cours de la Faculté des sciences de Paris, Cours de physique mathématique, Carré, Paris, 1892, 408 p. (Vol. 1: voir [1889a]).

- [1892b]. Lettre à M. Mouret sur les géométries non euclidiennes, *Revue générale des sciences pures et appliquées* 3, 1892, 74-75. Repris in Poincaré [1902 a] (parties des chap. 2 et 4).

- [1894a]. *Les oscillations électriques. Leçons professées pendant le premier trimestre 1892-1893*, rédigées par Charles Maurain. Cours de la Faculté des sciences de Paris, Carré, Paris, 1894.

- [1894b]. *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*, Collection Scientia, Carré et Naud, Paris, 1894, 80 p.

- [1895 a]. L'espace et la géométrie, *Revue de métaphysique et de morale* 3, 1895, 631-646. Repris in Poincaré [1902a] (chap. 4).

- [1895 b]. A propos de la théorie de M. Larmor, *L'éclairage électrique* 3, 1895, 5-13, 285-295; 5, 1895, 5-14, 385-392. Repris in Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 369-426.

¹⁴⁷ Dans le deuxième volume (1891), Poincaré corrige: ces leçons ont été professées de mars à juin 1888 «et non 1889 comme la couverture de ce premier volume le porte par erreur» (Poincaré [1891a], p. viii).

- [1897a]. Sur les rapports de l'analyse pure et de la physique mathématique, *Acta mathematica* 21, 1897, 331-341. Egalement dans Poincaré [1905a], [chapitre 5 : L'analyse et la physique].
- [1897b]. Les idées de Hertz sur la mécanique, *Revue générale des sciences pures et appliquées* 8, 1897, 734-743. Egalement dans Poincaré [1916-1965], vol. 7, p. 231-250, et dans Poincaré [1991], p. 61-86.
- [1898a]. La mesure du temps, *Revue de métaphysique et de morale* 6, 1898, 1-13. Egalement dans Poincaré [1905a], chapitre 5 (éd. 1970, p. 41-54).
- [1898b]. On the foundations of geometry, *The Monist* 9, 1898-1899, 1-43. Trad. fr. par Louis Rougier, *Des fondements de la géométrie*, Chiron, Paris, 1921. (Poincaré [1903a] est une version relativement voisine.)
- [1899]. Des fondements de la géométrie: à propos d'un livre de M. Russell, *Revue de métaphysique et de morale* 7, 1899, 251-279. Repris dans Poincaré 1902 a (chapitre 5: Expérience et géométrie). (Cf. Poincaré [1900 c]).
- [1900a]. Sur les relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique, in *Rapports présentés au Congrès international de physique de 1900*, Paris, 1900. Repris dans Poincaré [1902a] [chapitres 9 : "Les hypothèses en physique", et 10 : "Les théories de la physique moderne"], éd. 1968, p. 157-172, 173-190.
- [1900b]. La théorie de Lorentz et le principe de réaction, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 2^e série, 5, 1900, 252-278. Repris in Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 464-488.
- [1900c]. Sur les principes de la géométrie. Réponse à M. Russell, *Revue de métaphysique et de morale* 8, 1900, 73-86.
- [1900d]. Sur les principes de la mécanique (lecture faite au Congrès international de philosophie tenu à Paris du 1^{er} au 5 août 1900), *Bibliothèque du Congrès international de philosophie*, Vol. III, *Logique et histoire des sciences*, Armand Colin, Paris, 1901, p. 457-494. Repris dans Poincaré [1902]. [chapitres 6 : La mécanique classique, et 7 : Le mouvement relatif et le mouvement absolu], éd. 1968, p. 111-128; 129-138.
- [1901a]. *Electricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques. Leçons professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899. Cours de physique mathématique*. Deuxième édition, revue et complétée par Jules Blondin et Eugène Néculcéa, Carré et Naud, Paris, Gauthier-Villars, Paris, 1901. [Voir la première édition: Poincaré [1890a, 1891a], comportant les cours de 1888 et 1890].
- [1901b]. A propos des expériences de M. Crémieux, *Revue générale des sciences pures et appliquées* 12, 30 nov. 1901, 994-1007. Egalement dans Poincaré [1916-1965], vol. 10, p.391-420, et Poincaré [1991], p. 157-193.
- [1902a]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902 ; ré-éd., 1968.
- [1902b]. Compte-rendu de Hilbert: *Les fondements de la géométrie*, *Bulletin des sciences mathématiques* 26, 1902, 249-272 (septembre 1902; Rectification, *ibid.* ,

- 27, 1903, 115. Repris sous le titre Les fondements de la géométrie, *in* Poincaré [1913], p. 161-185. Egalement *in* Poincaré [1916-1965], vol. 11, p. 92-113.
- [1903a]. L'espace et ses trois dimensions, *Revue de métaphysique et de morale* 11, 1903, 281-301; 407-429. Repris *in* Poincaré [1905a] (chap. 3: La notion d'espace, et 4: L'espace et ses trois dimensions), ed. 1970, p. 55-76, 77-100. (Cf. Poincaré [1898 b].)
 - [1903]. Grandeur de l'astronomie, *Bulletin de la Société astronomique de France*, mai 1903, 253-259. Egalement dans Poincaré [1905a] [chapitre 6 : L'astronomie], ed. 1970, p. 115-122.
 - [1904a]. L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique, *La revue des idées*, novembre 1904, 801-818. Egalement, *Bulletin des sciences mathématiques* 28, 1904 (décembre), 302-324 [Conférence au Congrès international des arts et des sciences, Saint-Louis, Missouri, 24 septembre 1904]. Egalement dans Poincaré [1905a] [chapitres 7: L'histoire de la physique mathématique, 8: La crise actuelle de la physique mathématique, et 9: L'avenir de la physique mathématique], éd. 1970, p. 123-128, 129-140, 141-147].
 - [1904b]. La Terre tourne-t-elle ?, *Bulletin de la Société astronomique de France*, mai 1904, 216-217.
 - [1905a]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905; 1970.
 - [1905b]. Sur la dynamique de l'électron, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* 140, 1905 (séance du 5 juin), p. 1504-1508. Egalement *in* Poincaré [1924], p. 79-81. Egalement *in* Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 489-493, et Poincaré [1991], p. 213-218.
 - [1905c]. Sur la dynamique de l'électron (adunanza del 23 luglio 1905 [reçu le 23 juillet 1905]), *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* XXI, 1906, p. 129-176. Egalement *in* Poincaré [1924], p. 18-76. Egalement *in* Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 494-550.
 - [1907]. La relativité de l'espace, *L'année psychologique* 13, 1907, 1-17. Repris dans Poincaré [1908a], Livre 2, chapitre 1.
 - [1908a]. *Science et méthode* (1908), Flammarion, Paris, 1908. édition définitive, Flammarion, Paris, s.d.
 - [1908b]. La dynamique de l'électron, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 19, 1908, 386-402. Repris dans Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 551-586.
 - [1909a]. La mécanique nouvelle [Conférence à l'Association française pour l'avancement des sciences, Lille, 1909], *Comptes-rendus des sessions de l'Association française pour l'avancement des sciences, Congrès de Lille*, 1909, p. 38-48. Egalement dans *Revue scientifique, revue rose*, 7 août 1909, 170-177. Egalement dans *Revue d'électricité* 13, 1910, 23-28. Egalement *in* Poincaré [1924], p.1-17.
 - [1909b]. Dynamique de l'électron, . (Conférences à xxx des Postes et

télégraphes. Texte édité avec des notes par M. Pomey).

- [1910a]. *Sechs Vorträge über ausgewählte Gegenstände aus der Reinen Mathematik und mathematischen Physik*, Teubner, Leipzig, 1910. (Conférences Wolfskehl à Göttingen, 1909. Comprend, en particulier, la trad. en alld de Poincaré 1910b.)
- [1910b]. Die Neue Mechanik [Conférence à la Wissenschaftlichen Verein à Berlin, «traduite en allemand d'après le manuscrit de l'auteur» par P. Schwann], *Himmel und Erde* 23, 1910, 97-166. (Ce texte diffère largement de Poincaré [1909b].)
- [1911b]. Sur la théorie des quanta, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* 153, 1911, 1103-1108 (4 décembre 1911). Repris dans Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 620-625 et dans Poincaré [1991], p. 219-224.
- [1911c]. L'évolution des lois, *Scientia (Revista di scienza)*, Milano) 1911, 275-292. Egalement in Poincaré 1913a, p. 3-32 (et éd. 1963, p. 48-67). (Conférence au Congrès de philosophie de Bologne, 1911).
- [1912a]. Les rapports de la matière et de l'éther, *Journal de physique théorique et appliquée*, 8^{ème} série, 2, 1912, 347-360. (Conférence faite le 11 avril 1912 aux séances de Pâques de la Société française de physique à Paris). Egalement in Poincaré [1913], éd. 1963, p. 68-83. Egalement in Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 669-682.
- [1912b]. L'espace et le temps, *Scientia*, 12^{ème} année, vol. XXV, 1912, 159-170 [Conférence faite le 4 mai 1912 à l'Université de Londres]. Egalement in Poincaré [1913], éd. 1963, p. 97-109.
- [1912c]. L'hypothèse des quanta, *Revue scientifique, revue rose*, février 1912, 225-232. Egalement in Poincaré [1913], éd. 1963, p. 110-127.
- [1912d]. Les conceptions nouvelles de la matière (Conférence faite en 1912), in *Le matérialisme actuel*, Flammarion, Paris, 1913; 1926.
- [1912e]. Pourquoi l'espace a trois dimensions, *Revue de métaphysique et de morale* 20, 1912, 483-504. Repris in Poincaré [1913], p. 133-157.
- [1912f]. Sur la théorie des quanta, *Journal de physique théorique et appliquée*, 5^{ème} série, 2, 1912, 5-34. Repris dans Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 626-668.
- [1913]. *Dernières pensées*, Flammarion, Paris, 1913; rééd. 1963.
- [1921]. Analyse des travaux scientifiques de Henri Poincaré faite par lui-même, *Acta mathematica* 38, 1921, 1-135 (Repris et organisé suivant les thèmes dans Poincaré [1916-1965]).
- [1924]. *La mécanique nouvelle. Conférence, mémoire et note sur la théorie de la relativité*, Introduction de M. Edouard Guillaume, Gauthier-Villars, Paris, 1924.
- [1916-1965]. *Oeuvres*, publiées sous les auspices de l'Académie des sciences, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1916-1965.
- [1991]. *L'analyse et la recherche*, choix de textes et introduction de Girolamo

Ramunni, Hermann, Paris, 1991.

POTIER, Alfred [1874]. Conséquences de la formule de Fresnel relative à l'entraînement de l'éther par les milieux transparents, *Journal de physique*, 3, 1874, 201-204. Repris dans S F P [1912], *Mémoires sur l'électricité et l'optique*, Gauthier-Villars, Paris, 1912, p. 292-295.

ROUGIER, Louis [1920]. *La philosophie géométrique de Henri Poincaré*, Alcan, Paris, 1920.

SFP (SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE) [1912]. *Mémoires sur l'électricité et l'optique*, Gauthier-Villars, Paris, 1912.

TONNELAT, Marie-Antoinette [1972]. *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris, 1972.

TORRETTI, Roberto [1978]. *Philosophy of geometry from Riemann to Poincaré*, Reidel, Dordrecht, 1978.

- [1983]. *Relativity and geometry*, Pergamon press, Oxford, 1983.

VELTMANN, W. [1873]. Ueber die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien, *Annalen der Physik* (éd. par J. C. Poggendorf), 150, 1873, 497-535.

VIOT, Florence [1994]. *L'élaboration des principes variationnels en dynamique, de Lagrange à Hamilton et Jacobi*, Thèse de doctorat, Université Paris-7 Denis Diderot, septembre 1994.

VUILLEMIN, Jules [1970]. Préface à l'édition 1970 de Poincaré 1905 a (*La Valeur de la science*), Flammarion, Paris, 1970, p. 7-15.

- [1972]. Poincaré's philosophy of space, *Synthese* 24, 1972, 161-179.

WHITTAKER, Sir Edmund T. [1910]. *A History of the theories of aether and electricity: from the age of Descartes to the close of nineteenth century*, Longmans, Green and Co., London and New York, 1910. New ed. rev. and enlarged: *A History of the theories of aether and electricity, vol. 1: the classical theories*, Nelson, London and New York, 1951.

- [1953]. *A History of the theories of aether and electricity, vol 2: The Modern theories, 1900-1926*, Nelson, London, 1953.

WIEN, W [1901]. Ueber die Möglichkeit einer Elektromagnetischen Begründung der Mechanik, *Annalen der Physik*, 4^e série, 4, 1901, 501-513. Trad. fr., Sur la possibilité d'un fondement électromagnétique de la Mécanique, in Abraham, Langevin 1905, vol. 2.

ZAHAR, Elie [1989]. *Einstein's revolution. A study in heuristics*, Open Court, La Salle (Ill.), 1989.