

Poincaré, Langevin et Einstein

Michel PATY*

RESUME

Henri Poincaré (1854-1912), Paul Langevin (1871-1946) et Albert Einstein (1879-1955) se sont intéressés en physique théorique à des sujets voisins dont ils ont proposé des approches différentes, parfois convergentes quant aux résultats. Après un rappel de leurs relations mutuelles, et de la connaissance qu'ils avaient de leurs travaux respectifs, notamment en ce qui concerne l'électrodynamique et le principe de relativité, nous évoquons les problèmes autour desquels ils se sont rencontrés pour la première fois, à la réunion du Conseil Solvay de l'automne 1911, ceux de la physique quantique naissante, et nous analysons leurs pensées respectives de ce nouveau domaine. Puis nous revenons à la question de l'électrodynamique et de la relativité, esquissant un examen comparatif de leurs approches, qui permet de mettre en évidence leurs «styles» personnels, liés à leurs épistémologies respectives. En physique des électrons, et dans sa première conception de la théorie de la relativité, Langevin pourrait à première vue être considéré comme ayant une approche intermédiaire entre celle de Poincaré et celle d'Einstein. On est d'ailleurs tenté de se demander s'il n'a pas, en définitive, contribué à rapprocher Poincaré du point de vue d'Einstein. Leurs thèmes communs de recherche ou de préoccupation permettent de caractériser trois attitudes différentes par rapport à l'unité des phénomènes en relation à la possibilité d'unifier les théories physiques. On peut les résumer comme étant celle d'une diversité empirique pour une unité formelle autour de principes physiques (Poincaré), celle d'une unité de principe explorée par des principes physiques et accomplie par des «modèles théoriques» (Langevin), et celle d'une pensée du rapport de la théorie et de son objet aboutissant à une unification par les principes physiques (Einstein).

ABSTRACT. *Poincaré, Langevin and Einstein.*

Henri Poincaré (1854-1913), Paul Langevin (1871-1946) and Albert Einstein (1879-1955) have been interested in neighbouring problems of theoretical physics, of which they proposed different approaches, sometimes with converging results. After a reminder of their mutual relationships and knowledge of each others' works, notably about electrodynamics and the principle of relativity, we evoke the problems around which they met for the first time, on occasion of the first Solvay Meeting at the autumn of 1911, i.e. those of the nascent quantum physics, and we analyze their respective thoughts of this new domain. Then we come back to the question of electrodynamics and relativity, sketching a comparative examination of their understanding of it, that allows to put in evidence their personal «styles», related to their respective epistemologies. From his works on the physics of electrons and his first conception of the theory of relativity, Langevin's approach to these problems could at first sight be considered as intermediate between those of Poincaré and of Einstein. One is actually led to suggest some influence of Langevin on a late Poincaré's approximation towards Einstein's point of view. The common themes of research or of concern of the three scientists allow to characterize three different attitudes with respect to the unity of phenomena and to the correlated means to unify physical theories. One can summarize these as : 1) an empirical diversity towards a formal unity around physical principles (Poincaré) ; 2) a unity of principle explored by physical principles and accomplished through the

* Equipe REHSEIS (UMR 7596), Centre National de la Recherche Scientifique et Université Paris 7-Denis Diderot, Centre Javelot, 2 Place Jussieu, F-75251 Paris-Cedex 05. paty@paris7.jussieu.fr

help of «theoretical models» (Langevin) ; and 3) a thought of the close connection of the theory with its object leading to a unification through the physical principles (Einstein).

1

INTRODUCTION: CROISEMENT DE DESTINEES.

Sur une photographie

Les trajectoires en ce monde des personnes qui font l'objet de cet exposé ne se sont croisées toutes les trois ensemble qu'en un seul point d'espace-temps, pour employer une image que nous leur devons à des titres divers. Il nous en reste, pour les implications futures, les effets propagés par les mémoires, et, quant à l'évidence objective, les traces écrites de l'événement ainsi qu'une photographie instantanée, coupe dans le temps - simultanéité des présences, à l'automne 1911 -, et contour localisé dans l'espace - l'Hotel Solvay à Bruxelles. Leur rencontre eut lieu, en effet, au premier Conseil de Physique Solvay, qui se tint du 30 octobre au 3 novembre 1911, avec pour thème *La physique du rayonnement et les quanta*. On voit sur la photographie, réunis à l'initiative du mécène industriel belge Ernest Solvay, avec d'autres savants illustres tels que Hendryk Antoon Lorentz, Max Planck, Ernest Rutherford ou Marie Curie, ceux qui nous occupent ici, Henri Poincaré, le plus âgé des trois (né en 1854, il a alors 58 ans), Paul Langevin (né en 1871, il en a 41), et le plus jeune, Albert Einstein (né en 1879, il a 33 ans).

Le rapprochement de ces trois savants qui ont marqué tout particulièrement la science de leur temps n'est pas fortuit, et l'évocation de leur rencontre unique est tout sauf anecdotique. Sa signification profonde se laisse pressentir à l'émotion procurée par l'ancienne photographie, et nous voudrions en analyser quelques aspects dans ce qui suit. Cette signification se rattache à leurs personnalités humaines et intellectuelles et aux relations mutuelles qu'elles ont entretenu, dans un monde «plein de bruit et de fureur» tout comme dans celui, plus serein mais non moins chargé d'imprévu, des idées, et en particulier en un moment privilégié du renouvellement de la physique contemporaine. Poincaré, Langevin et Einstein furent, chacun à sa façon, des protagonistes considérables de ces renouvellements, avec, certes, les autres participants de cette réunion du Conseil Solvay, sans oublier quelques autres qui n'y étaient pas. Mais, de la photographie, ce sont ces trois que le regard choisit d'approcher en gros plans alternés, pour des raisons qui peuvent paraître à première vue subjectives, mais qui n'en sont pas moins intellectuellement fondées.

Poincaré et Langevin

Poincaré et Langevin se connaissaient bien. Langevin avait suivi les cours de Poincaré à la Sorbonne quand il était élève à l'École Normale Supérieure, et avait lu ses grands ouvrages de physique mathématique¹. Tous deux avaient été envoyés, en 1904, comme représentants de la France au *Congrès des Sciences et des Arts* de Saint Louis du Missouri, où Poincaré donna sa conférence sur «L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique» et Langevin la sienne sur «La physique des électrons»². Ils avaient fait ensemble le voyage de retour à travers les États-Unis d'Amérique, voyage que Langevin devait évoquer plus tard en ces termes : «J'eus l'occasion de voir avec quel intérêt passionné Henri Poincaré suivait toutes les phases de la révolution qui s'accomplissait ainsi dans nos conceptions les plus fondamentales. Il voyait avec un peu d'inquiétude ébranler, grâce aux instruments forgés par lui-même, le vieil édifice de la dynamique newtonienne qu'il avait récemment encore couronné par ses admirables travaux sur le problème des trois corps et la forme d'équilibre des corps célestes. Mais si son enthousiasme était plus réfléchi que le mien, il était, comme nous tous, dominé par la fièvre d'entrer dans un monde entièrement nouveau»³.

Langevin connaissait les travaux de Poincaré sur la théorie de Lorentz en électrodynamique, dont il s'inspira, et Poincaré était au courant de ceux de Langevin, expérimentaux sur les électrons et les ions (réalisés avant 1904), et théoriques sur l'inertie électromagnétique et sur la théorie du magnétisme (développés à partir de 1904). En particulier, dans son long mémoire (de 1905, paru en 1906 dans les *Rendiconti* du Cercle mathématique de Palerme) sur «La dynamique de l'électron», parallèle à celui d'Einstein sur «L'électrodynamique des corps en mouvement», Poincaré mentionne le modèle de l'électron de Langevin et surtout les calculs de ce dernier sur le rayonnement d'un électron accéléré, soulignant l'importance du concept d'onde d'accélération développé par Langevin, qui appartient désormais à l'électrodynamique classique⁴.

Les recherches de Poincaré sur ce thème, centrées autour de la question de l'impossibilité de mettre en évidence le «vent d'éther» ou mouvement absolu, entreprises dès 1895, avaient culminé dans ce que l'on peut appeler sa *théorie relativiste de l'électrodynamique*, exposée dans ce mémoire. Il y avait obtenu les mêmes formules théoriques que celles auxquelles Einstein était parvenu indépendamment de son côté, pour les transformations de coordonnées (dites de Lorentz), la loi de composition des vitesses, différente de l'addition galiléenne, ainsi que la forme symétrique et invariante des équations de Maxwell, avec le principe de relativité et le caractère d'invariant et de limite absolue de la vitesse de la lumière⁵.

Quant à Langevin, il avait présenté en 1903 un modèle dynamique de l'électron variable, satisfaisant à la contraction de Lorentz-FitzGerald, et à volume constant⁶, mais non relativiste (comme Poincaré l'avait fait remarquer) ; il s'était, par ailleurs, intéressé aussi à la relativité pour l'optique (il avait publié en 1905 un

¹ Langevin [1913c].

² Poincaré [1904], Langevin [1904].

³ Langevin [1913c].

⁴ Poincaré [1905c], Langevin [1904, 1905a].

⁵ Sur ces recherches de Poincaré, voir, en particulier, Paty [1996a ; à paraître, a].

⁶ Cette communication fut publiée en 1905 (Langevin [1905e]). Alfred Bücherer proposa indépendamment le même modèle (Bücherer [1904], p. 57-58).

mémoire sur le mouvement absolu de la Terre⁷). Il avait abordé les problèmes électrodynamiques sous l'angle de l'inertie électromagnétique et des phénomènes liés au magnétisme⁸, puis il avait eu connaissance des articles d'Einstein de 1905, sur l'électrodynamique des corps en mouvement et sur l'inertie de l'énergie (qui constituent ce qui s'est ensuite appelé la théorie de la relativité restreinte), et s'était immédiatement convaincu de la supériorité de la solution et du point de vue de cet auteur, qui lui était encore inconnu, sur les autres approches de l'électrodynamique⁹.

Poincaré et Langevin sur Einstein

Avant le Conseil Solvay de 1911, ni Poincaré ni Langevin n'avaient encore rencontré directement Einstein, mais ils avaient eu tous les deux connaissance de son existence et de ses travaux. Les écrits publiés de Poincaré ne l'attestent pas, puisque le nom d'Einstein n'y apparaît qu'après la réunion du Conseil, dans un mémoire sur les quanta où Poincaré le cite pour son hypothèse de la quantification de l'énergie du rayonnement¹⁰. Sur l'électrodynamique et le principe de relativité, Poincaré ne mentionna jamais le nom d'Einstein dans ses écrits. Parlant du «principe de relativité» pour l'électrodynamique, il le rapporta toujours à Lorentz, dès son propre travail de 1905 et jusqu'à ses derniers textes sur la «mécanique nouvelle» (c'est-à-dire relativiste dans le sens restreint aux mouvements d'inertie) : les équations de transformation des coordonnées et du temps respectant le principe de relativité (dénommées «de Lorentz» par Poincaré, en référence au travail de 1904 du savant néerlandais) constituaient le «groupe de Lorentz».

De nombreux commentateurs ont inféré de ce silence que Poincaré avait refusé la relativité restreinte d'Einstein ; mais cela ne saurait être dit sans schématisme, quand Poincaré avait lui-même développé, indépendamment d'Einstein et en même temps, une théorie relativiste de l'électrodynamique, aboutissement de ses propres recherches sur l'électrodynamique menées de 1895 à 1905. Ce silence, par ailleurs, ne semble pas avoir été total puisque nous savons, par le livre d'un mémorialiste, Alexander Moszkovski, publié en 1921, que Poincaré mentionna le nom d'Einstein de manière élogieuse en 1909, lors d'une conférence qu'il donna à Berlin sur la «mécanique nouvelle»¹¹. La dynamique de l'électron de Poincaré présente de nombreux points communs avec la théorie d'Einstein de la relativité restreinte, les deux ayant été suscitées par la considération de l'«électrodynamique des corps en mouvement», mais la seconde est de portée plus générale : les deux théories ne se confondent pas, leurs structures et leurs «objets» étant clairement distincts¹².

⁷ Langevin [1905b].

⁸ Langevin [1905a, e, f, g].

⁹ Sur le profil scientifique de Langevin et sur ses contributions à l'électrodynamique et à la relativité, voir Paty [1985, 1986a, 1999b]. Pour sa biographie, voir Bensaude-Vincent [1987].

¹⁰ Poincaré [1912b].

¹¹ Moszkowski [1921]. Le texte en français d'une conférence donnée à Lille (Poincaré [1909]), censé correspondre à la conférence de Berlin, ne mentionne pas Einstein, mais sans doute Poincaré ne l'a-t-il pas suivi exactement dans son exposé à Berlin.

¹² Nous les avons analysées en détail par ailleurs (Paty [1993], chapitre 2 ; [1996a]).

Tout en ayant suivi des chemins sensiblement différents - avec un même point de départ dans la théorie des électrons proposée par Lorentz en 1895¹³ -, Poincaré et Einstein avaient abouti à des énoncés voisins sur plusieurs des aspects fondamentaux de la théorie. Malgré ce parallélisme, ils semblent avoir ignoré mutuellement leurs travaux respectifs dans le domaine de l'électrodynamique et du principe de relativité, Poincaré ne s'étant jamais référé par écrit à ceux d'Einstein, et ce dernier n'ayant pas lu alors - ni même encore longtemps plus tard - l'article final de Poincaré, paru il est vrai dans une publication lue essentiellement par les mathématiciens et, au mieux, par des physico-mathématiciens¹⁴.

En ce qui concerne Langevin, il avait donc entendu parler d'Einstein pour la première fois un jour de l'hiver 1905-1906, lorsque son assistant Edmond Bauer lui apporta les numéros des *Annalen der Physik* contenant les articles d'Einstein sur la relativité restreinte de 1905, en particulier celui qui établissait l'équivalence de la matière et de l'énergie¹⁵. "Voici qui vous intéressera sûrement", dit Bauer à Langevin, dont le cours au Collège de France s'intitulait cette année-là (1905-1906) : *Etude expérimentale des diverses radiations. Application de la théorie des électrons*. Bauer avait reconnu dans le second article une formule qu'il avait vu Langevin écrire au tableau noir quelque temps auparavant, par une extension de l'inertie de la masse électromagnétique à l'inertie de l'énergie en général, soit $m = \frac{E}{c^2}$ ¹⁶. Langevin lut aussitôt ces mémoires, dans lesquels Einstein reconstruisait une cinématique d'espace et de temps fondée sur le principe de relativité (pour les mouvements d'inertie) et sur la constance de la vitesse de la lumière dans les transformations de repères de coordonnées, d'où s'ensuivait une dynamique transformée (avec une forme des équations de Maxwell invariante sous ces transformations).

Langevin reconnut donc la théorie d'Einstein comme l'approche la plus générale et la plus satisfaisante des phénomènes non pas seulement de l'électrodynamique, mais aussi de la mécanique, et il la fit sienne. Du moins adopta-t-il la *théorie* d'Einstein (ses principes, ses relations de concepts et ses équations), sinon totalement la *manière de voir* de ce dernier, car il la comprenait suivant les grilles conceptuelles de son cheminement propre, donnant à l'inertie électromagnétique une place privilégiée, et voyant dans la théorie de la relativité une dynamique électromagnétique : nous y reviendrons. Il enseigna et diffusa dès lors cette théorie tout en l'interprétant à sa manière, selon une perspective électromagnétique sur la matière (la «vision électromagnétique du monde», partagée aussi par H. Lorentz, W. Wien, H. Minkowski et d'autres), et parlant encore d'«éther électromagnétique» pour désigner le champ. (On sait qu'Einstein avait posé dans son article de 1905 que l'éther luminifère était devenu un concept inutile).

Langevin apporta des contributions originales aux développements de la théorie de la relativité, dont il enrichit la compréhension du point de vue de sa signification et de ses implications physiques, essentiellement en ce qui concerne l'*inertie de l'énergie* (et la possibilité de sa mise en évidence dans les énergies de

¹³ Lorentz [1895].

¹⁴ Sur la réception des idées d'Einstein chez ces derniers, voir Walter [1996, 1999].

¹⁵ Einstein [1905d, e].

¹⁶ Bauer [1956] ; Langevin, A. [1971], p. 58-59, et Langevin, L. [1972], p. 5-6. En fait, Jean Perrin et d'autres collègues l'auraient dissuadé de publier cette relation, selon un ancien élève de Langevin, Michel Tournier (rapporté dans Langevin A. [1971], p. 59).

liaison des noyaux atomiques)¹⁷, ainsi que les nouveaux rapports entre l'espace, le temps et la causalité (en particulier, faisant directement concevoir la relativité des durées avec son «expérience de pensée» détaillée, connue comme celle du «voyageur de Langevin»)¹⁸. Il exposa ces idées dès 1911, l'année même du Conseil Solvay (mais à des rencontres philosophiques, à Bologne et à Paris).

Langevin avait aussi connu très tôt la théorie du mouvement brownien d'Einstein. C'est un sujet qu'il avait lui-même déjà abordé dans son mémoire sur la physique des électrons de 1904, et surtout il y était revenu en 1908, citant les travaux d'Einstein de 1905 et 1906, et montrant que l'approche de M. von Smoluchowski de 1906¹⁹ aboutissait en fait à retrouver les résultats de ces recherches, dont il formulait lui-même une démonstration plus simple²⁰. Il fut assurément un intermédiaire entre Einstein et Jean Perrin, en ce qui concerne l'interprétation théorique des observations de ce dernier par laquelle l'existence physique des atomes se voyait «démontrée»²¹.

Einstein sur Poincaré et sur Langevin

Quant à Einstein, il connaissait Poincaré de réputation comme mathématicien, bien entendu, mais il avait aussi lu certains de ses cours de «Physique mathématique», et son premier livre de «philosophie scientifique», *La science et l'hypothèse*, étudié et médité dans ses années de formation. Cet ouvrage l'influença par sa critique des concepts absolus de la mécanique, au même titre que *La Mécanique* de Mach, que Poincaré et Langevin avaient lu, eux aussi, de leur côté. A l'époque de ses recherches sur l'électrodynamique qui avaient abouti à sa théorie de la relativité restreinte, Einstein avait eu connaissance de certains des travaux de Poincaré sur l'électrodynamique de Lorentz, jusqu'à celui de 1900, sur «La théorie de Lorentz et le principe de réaction», mais non celui de 1905, «Sur la dynamique de l'électron», parallèle au sien sur «L'électrodynamique des corps en mouvement», et rédigé pratiquement en même temps, qui ne parut qu'en 1906 (et dans une revue mathématique et non pas physique)²².

Einstein était également au fait de certains travaux de Langevin, notamment sur la théorie cinétique. Il avait fait paraître, en 1905, dans la revue *Bleitblätter zu der Annalen der Physik*, un compte-rendu d'un travail du physicien français «Sur une formule fondamentale de la théorie [cinétique] des gaz», qui avait été publié un peu avant, la même année, d'abord sous la forme d'une brève communication dans les *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, puis sous celle, plus étendue, d'un article dans les *Annales de Physique et de Chimie* avec le détail des calculs dans la démonstration des formules²³. Langevin donnait dans ce travail, qui constitue une contribution importante à la mécanique statistique, sujet où Einstein était, de son côté, passé expert, une solution du problème de la diffusion de deux gaz soumis à une action extérieure, en faisant diverses hypothèses sur les dimensions, les masses et l'interaction mutuelle des molécules, et l'appliquait en outre à la physique

¹⁷ Langevin [1913a]. Voir De Broglie [1947].

¹⁸ Langevin [1911c et d].

¹⁹ Smoluchowski [1906].

²⁰ Langevin [1908].

²¹ Perrin [1908, 1909, 1913]. Voir Paty [1988], chapitre 3.

²² Poincaré [1905a et b], Einstein [1905d et c].

²³ Langevin [1905c et d] et Einstein [1905f]. Cf Paty [1993a], chap. 2, 8.

des ions, dont il était devenu par sa thèse l'un des spécialistes incontestés²⁴. Einstein accompagna évidemment aussi, avec les travaux de Jean Perrin sur les mouvement moléculaires, les remarques sur ce sujet de Langevin que nous avons mentionnées plus haut.

Ce fut donc au premier Conseil Solvay de novembre 1911 que Poincaré, Langevin et Einstein se trouvèrent réunis ensemble pour la première et la dernière fois de leur vie. En effet, si la réunion fut, pour Langevin et Einstein, le premier moment d'une longue fréquentation intellectuelle et d'une amitié profonde, elle fut l'une des dernières grandes assemblées scientifiques auxquelles participa Poincaré, qui mourut quelques mois plus tard, au mois de juin de l'année suivante, des suites d'une opération. La réunion du Conseil fut aussi l'occasion, pour Poincaré, de se pencher sur la question, alors très obscure encore du point de vue théorique, des quanta d'énergie, et d'y apporter une contribution qui fut décisive.

2.

LES DEBATS DE BRUXELLES, 1911 : PHYSIQUE DES QUANTA ET DISTRIBUTIONS DE PROBABILITES

Si l'électrodynamique et le principe de relativité avaient été dans la période récente leur principal centre d'intérêt commun en physique, ce fut la physique des quanta encore balbutiante qui occupa, au Premier Conseil Solvay réuni à Bruxelles, la plus grande partie des exposés et l'essentiel des discussions²⁵ - et peut-être même les conversations privées entre les participants, dans les moments libres du Congrès. Langevin et Einstein présentèrent des exposés et participèrent activement, ainsi que Poincaré, aux discussions. Sur celles qui ont eu lieu en séance, nous disposons des notes de retranscription publiées dans les actes du Conseil, dans la version remaniée par les auteurs des interventions, à la demande de Paul Langevin et Maurice de Broglie, chargés de la publication des actes. (Les textes et les interventions en allemand et en anglais furent traduits en français par Paul Langevin)²⁶.

²⁴ Langevin, rapporte Einstein, montre que, dans les flammes, la masse du corpuscule électrisé négativement est environ mille fois plus petite que celle de la particule positive, identifiée à l'atome d'hydrogène (rayons canaux) : c'est, en fait, un électron.

²⁵ Langevin, de Broglie [1912], et version en allemand (comprenant les originaux des intervenants dans cette langue) : Eucken [1914]. Les interventions aux exposés y ont été retranscrites après révision par les auteurs.

²⁶ De Broglie et Langevin [1912], Eucken [1914].

Travaux et discussions sur l'hypothèse des quanta

Einstein intervint dans les discussions qui suivirent la plupart des exposés, Langevin et Poincaré prirent part à plusieurs d'entre elles, et tous participèrent à la discussion générale. Après l'exposé de Walter Nernst sur des «Applications de la théorie des quanta à divers problèmes physico-chimiques»²⁷, une discussion s'établit entre ce dernier, Einstein, Poincaré, Langevin, Kammerlingh Onnes et Rutherford sur le comportement des gaz à basse température.

La conférence de Langevin, qui fut l'avant-dernière, portait sur «La théorie cinétique du magnétisme et les magnétons»²⁸. Il y faisait une revue de la théorie cinétique du magnétisme (il avait développé quelques années auparavant sa théorie classique du dia- et du paramagnétisme²⁹), et en particulier des travaux de Pierre Weiss sur le ferromagnétisme. Il proposait lui-même un modèle moléculaire de l'aimantation, basé sur le «principe de Sommerfeld» (échange de quantité d'action dans les processus d'interaction moléculaire) pour rendre compte de l'hypothèse quantique tout en restant compatible avec l'électrodynamique classique. Lors de la discussion, Einstein fit ce commentaire : «Il serait intéressant d'appliquer le calcul ci-dessus à un électron unique dans un champ magnétique». Réfléchissant sur cette question, il considéra un peu plus tard que la mécanique cesse en fait déjà d'être vérifiée pour un électron en rotation autour d'un champ magnétique. Ce qui était un argument de plus pour que la quantification soit irréductible, comme il s'en était rendu compte dès 1906³⁰.

L'exposé présenté par Einstein, dernier dans l'ordre, portait sur les chaleurs spécifiques («L'état actuel du problème des chaleurs spécifiques»³¹) et reprenait l'ensemble des résultats qu'il avait obtenus depuis 1907 dans ce domaine, en étendant aux atomes la quantification de l'énergie, et rendant ainsi compte d'effets inexplicables classiquement, comme les comportements de ces chaleurs spécifiques aux basses températures.

Cette présentation fut suivie d'une discussion générale, introduite par Einstein, et à laquelle participèrent notamment Planck, Lorentz, Langevin et Poincaré, ainsi, bien sûr, qu'Einstein lui-même, qui s'y tailla la part du lion³². Bien que ses idées sur les quanta ne fussent pas encore acceptées d'une manière unanime, il était mis en «vedette» à ce Congrès, sa réputation étant déjà bien établie par ses travaux sur les fronts les plus avancés de la physique, notamment sur les quanta. En particulier, certains de ses résultats théoriques, tant sur le potentiel d'arrêt des électrons dans l'effet photoélectrique, que sur les fluctuations de grandeurs caractéristiques du rayonnement, ou sur les propriétés des chaleurs spécifiques aux basses températures, se prêtaient à la vérification expérimentale. Il était en outre

²⁷ Nernst [1912].

²⁸ Langevin [1912b].

²⁹ Langevin [1905e, f, g].

³⁰ Einstein [1906b]. Voir Jammer [1966], Kuhn [1978], Paty [à paraître].

³¹ Einstein [1912], exposé présenté le 3 novembre 1911.

³² Les interventions d'Einstein aux différents exposés présentés ont été reproduites dans Einstein, CP, vol. 3, p. 504-519 (et vol. de trad angl., p. 391-401). L'ensemble des interventions à la «Discussion générale» qui suivit l'exposé d'Einstein, et introduite par ce dernier a été repris (d'après la version en allemand) dans Einstein, CP, vol. 3, p. 550-562 (et vol. de trad angl., p. 426-437).

l'auteur de la théorie de la relativité restreinte dont l'importance, pour être encore souvent sous-estimée par les physiciens en ce qui concerne la portée de sa voie propre, était dans son ensemble reconnue par eux au moins comme variante de la théorie électrodynamique relativiste de Lorentz (et de Poincaré, dont les derniers travaux sur le sujet étaient eux-mêmes sans doute mieux connus des mathématiciens que des physiciens).

Einstein se révéla, à coup sûr, à cette réunion du Conseil Solvay, par la richesse et la multiplicité de ses interventions, comme l'un de ceux (sinon celui) qui dominaient le plus les problèmes abordés, tant théoriques qu'expérimentaux, et il avait, de fait, plusieurs longueurs d'avance sur la plupart de ses collègues quant à la pénétration en profondeur de ces problèmes.

Principe de Boltzmann, probabilité et fluctuations

Le débat porta essentiellement sur la signification de la probabilité qui figure dans l'équation de Boltzmann (laquelle exprime la proportionnalité de l'entropie d'un état avec le logarithme de sa probabilité, $S = k \text{Log } W$), et sur la légitimité d'utiliser cette dernière, dans le cas d'une cavité emplie de radiation. Einstein considérait que c'est le rayonnement lui-même, de fréquence donnée, qui porte l'énergie (la fréquence et l'énergie ont des transformations de Lorentz identiques, comme Einstein l'avait remarqué déjà en 1909 et même, à vrai dire, dès 1905 ; leur rapport est donc une constante)³³. Il interprétait (selon sa conception établie dès 1903), et fondait son raisonnement sur la loi de Boltzmann en thermodynamique, qu'il considérait, pour sa part, comme un *principe* (il l'appelait le «principe de Boltzmann»), en concevant la probabilité d'une manière physique et «phénoménologique» comme la probabilité d'un état donné dans le temps, et donc indépendamment d'une théorie comme la mécanique statistique.

C'est ce qu'il fit valoir à Poincaré qui se demandait pourquoi il ne prenait pas la probabilité au sens de Gibbs³⁴. Retranscrivons cet échange, où intervint aussi Lorentz³⁵. Poincaré : “Quand on définit la probabilité, le choix de la différentielle à prendre comme facteur n'est pas arbitraire ; on doit prendre un élément de l'espace des phases”. Lorentz : “M. Einstein ne suit pas la méthode de Gibbs ; il parle simplement de la probabilité d'une valeur spécifique de la coordonnées z ”. Einstein : “Ce qui caractérise de ce point de vue, c'est qu'on utilise la probabilité (temporelle) d'un état définie de manière seulement *phénoménologique* (*dass man die (zeitliche) Wahrscheinlichkeit eines rein phänomenologisch definierten Zustandes benutzt*). On y gagne cet avantage de ne devoir fonder l'analyse sur aucune théorie élémentaire particulière”. Poincaré : “Dans toute théorie que l'on veut introduire au lieu de la mécanique ordinaire, on doit mettre comme différentielle, à la place de l'élément d'espace des phases, un élément invariant”. Ce qu'il voulait dire, c'est que si l'on ne voulait pas utiliser l'espace des phases de la mécanique (c'est-dire de la mécanique statistique de

³³ Cf. Paty [2000a ; à paraître, a].

³⁴ Einstein, CP, vol. 3, p. 554 (et vol. de trad. angl., p. 430).

³⁵ De Broglie et Langevin [1912] ; cf. aussi Einstein, CP, vol. 3, p. 554 (et vol. de trad. angl., p. 430).

Gibbs), il fallait cependant utiliser un invariant (du type de l'invariant de Liouville, élément de volume d'espace des phases)³⁶.

L'opinion de Poincaré était donc encore réservée (ce dont Einstein, on le verra, se plaignit à ses intimes). Quant à Langevin, s'il ne se prononça pas alors sur ce point précis, il fit sienne, en tout cas, peu de temps après, la position d'Einstein, car elle rejoignait ses propres conceptions sur le rôle des probabilités dans la «physique nouvelle» des atomes et des rayonnements de diverses sortes (lumineux, radioactif...).

Langevin s'arrête, en effet, dans son exposé de 1913 intitulé «La physique du discontinu», sur cette interprétation fréquentielle de la probabilité en thermodynamique, telle qu'elle figure dans la formule de Boltzmann exprimant l'entropie, pour en souligner et en détailler le bien-fondé. Il y insiste sur sa conséquence quant aux fluctuations, qui permettent de mettre en évidence par le calcul des propriétés physiques variées découlant directement de l'hypothèse quantique³⁷. Il ajoute que ces fluctuations font comprendre d'une manière moins absolue le «principe de Carnot» (le second principe de la thermodynamique), puisque les configurations d'équilibre (et en particulier celles d'équilibre maximum) ne sont plus rigides et «ne correspondent en réalité qu'à un aspect moyen autour duquel la matière est en frémissement continu et effectue des fluctuations d'autant plus importantes relativement que le nombre de molécules présentes est plus faible». Il inscrit en outre, dans cet article, ce point de vue, adopté pour le rayonnement, parmi les autres approches probabilistes en physique, où les calculs de fluctuations sont également utiles, pour les phénomènes atomiques et radioactifs, en mettant en évidence l'utilisation, dans tous ces cas, de probabilités continues, permise par l'utilisation de la variable temps³⁸.

Concernant la validité de la relation de Boltzmann dans le cas du rayonnement, contestée par Wilhelm Wien qui estimait qu'elle ne valait que pour le processus d'émission, Einstein argumenta à nouveau longuement, montrant par un raisonnement qualitatif qu'il y a contradiction entre la théorie classique (ondulatoire) du rayonnement et la distribution du rayonnement enfermé dans une cavité, et que ceci n'affecte pas la règle de Boltzmann. En fin de compte, si “l'hypothèse quantique est une tentative provisoire pour interpréter la probabilité statistique W du rayonnement”, il lui semblait bien qu'on ne pouvait échapper à cette hypothèse qui devait être adjointe irréductiblement à l'électrodynamique de Maxwell³⁹. Planck, quant à lui, déclarait admettre, avec Einstein, la validité générale de la relation de Boltzmann, comme expression probabiliste de la seconde loi de la thermodynamique, mais contestait qu'il y eût une “définition complètement générale de la probabilité” utilisable en dehors de la dynamique classique ; la relation entre probabilité et fluctuations pour le rayonnement seul lui semblait trop

³⁶ Poincaré a explicité le sens des remarques indiquées dans son exposé général sur les travaux du Conseil Solvay et le problème des quanta (Poincaré [1912a]).

³⁷ Langevin [1913b]1923, p. 245.

³⁸ *Ibid.*, et p. 191, 209, 245, 251 et suiv.

³⁹ Einstein, in De Broglie et Langevin [1912] ; Einstein, CP, vol. 3, p. 556 (et vol. de trad. angl., p. 431).

simpliste pour pouvoir rendre compte de la complexité des états possibles⁴⁰. Il proposait de revenir aux processus d'émission ou d'absorption.

Langevin souligna, après Lorentz, la généralité de la relation de Boltzmann. Selon lui, l'équation de Boltzmann, étant valide pour un système "de matière et d'éther" (c'est-à-dire matière-rayonnement), devait l'être également pour les deux séparément, pour peu que l'on puisse définir une entropie et une probabilité pour le rayonnement⁴¹, ce qui allait dans le sens d'Einstein et à quoi Poincaré opina⁴². Lorentz reprit la parole pour souligner comment la formule de fluctuation d'énergie d'Einstein (où domine le terme $h\nu/E$) est "de fait totalement incompatible avec les équations de Maxwell et avec les vues admises sur l'électrodynamique".

Dans la discussion, à propos des chaleurs spécifiques, objet de l'exposé d'Einstein, Langevin souligna que l'hypothèse des quanta, malgré son caractère "imprécis" (sans doute voulait-il en souligner, par ce terme, les obscurités conceptuelles), s'était montrée fort utile. Poincaré se demanda, sur le moment, si avant d'admettre les discontinuités, "qui nous forceraient à abandonner l'expression habituelle des lois naturelles sous forme d'équations différentielles", il ne vaudrait pas mieux essayer d'autres modèles (par exemple, une forme différente de variation de la masse électromagnétique, comme le proposait Nernst)⁴³. Nous verrons comment, en fait, reprenant la question après la réunion du Conseil, il devait conclure différemment, faisant sienne l'hypothèse de la discontinuité quantique.

Opinions d'Einstein

Einstein a évoqué, dans des lettres à des correspondants, sa rencontre avec Poincaré à l'occasion du Conseil Solvay. Il s'y plaignait de ce que Poincaré ne s'intéressait pas à son point de vue. On a voulu souvent y voir une preuve du refus, par Poincaré, de la relativité restreinte : telle est l'interprétation donnée par Théo Kahan, reprise par Pierre Spézioli dans son édition de la correspondance d'Einstein avec Besso, et par d'autres auteurs, comme Holton, Miller ou Pais⁴⁴. Il faudrait cependant, pour en juger ainsi, que les discussions aient porté sur la théorie de la relativité. Or, rien n'est moins sûr. La relativité ne fut pas abordée dans les débats retranscrits et, si nous ne savons que peu de choses des conversations hors séance entre les participants, Einstein, quant à lui, ne paraît se référer, dans ses lettres, qu'aux réactions sur les quanta⁴⁵. Il est vraisemblable qu'ils aient parlé avant tout de

⁴⁰ Planck, in De Broglie et Langevin [1912] ; Einstein, CP, vol. 3, p. 556 (et vol. de trad. angl., p. 432).

⁴¹ La probabilité d'une configuration matière-éther doit être égale, indique-t-il, au produit la probabilité de l'état de la matière par celle de l'état de l'éther; et les entropies correspondantes, à la somme des entropies de chacun. Le rapport de proportionnalité entre entropie et logarithme de la probabilité doit donc être préservé.

⁴² "C'est exactement sur cela que les définitions aussi bien de l'entropie que de la probabilité sont fondées" (Poincaré, in de Broglie et Langevin [1912] ; Einstein, CP, vol. 3, p. 557 (et vol. de trad. angl., p. 432).

⁴³ Poincaré, interventions dans de Broglie et Langevin [1912], p. 451-453.

⁴⁴ Holton [1973], Miller [1981], Pais [1982], p. 170.

⁴⁵ Einstein, lettres à Zangger, 7 et 15 nov. 1911, in Einstein, CP, vol. 5, p. 345-346, 349-350. La présente étude modifie une idée contraire exprimée dans un ancien travail, où j'avais suivi l'opinion commune selon laquelle c'était la relativité qui était en question, et Poincaré aurait manifesté une

leurs vues sur les problèmes actuels et futurs de la physique ; or, pour les uns comme pour les autres, la relativité restreinte, quel que fût le sens qu'ils leur donnaient, était acquise et n'était plus vraiment remise en question⁴⁶.

Nous savons qu'Einstein - et c'est aussi bien le cas de Poincaré - pensait la physique dans son mouvement en avant, et c'était dans cette perspective même qu'il considérait les connaissances du passé, même récent. En 1911, il avait repris le problème de la relativité générale (qu'il avait abordé dès 1907), et les questions reliées à la théorie de la gravitation et à la relativité générale alors entrevue par lui l'auraient davantage motivé. Il n'effectuerait toutefois le pas décisif vers sa théorie que l'année suivante, et il est peu probable qu'il se soit alors étendu sur ses idées à cet égard avec Poincaré.

Les thèmes des exposés et des discussions du Conseil ayant essentiellement porté, conformément au programme, sur "la théorie du rayonnement et les quanta", c'est probablement sur ce sujet que les échanges privés auront eux-même porté. On en a une confirmation dans le fait que c'est bien des quanta qu'il s'agit dans une remarque faite par Einstein à Heinrich Zangger sur l'attitude négative de Planck (Planck qui lui avait été immédiatement acquis pour la relativité restreinte), qui suit immédiatement sa remarque sur Poincaré.

Dans une première lettre écrite de Prague à Heinrich Zangger immédiatement après son retour du Conseil Solvay, Einstein avait exprimé sa satisfaction et même son enthousiasme d'avoir participé à cette réunion, en particulier en raison de la qualité, humaine et intellectuelle, des nouvelles relations qu'il y avait nouées : "Je suis rentré hier soir de Bruxelles, où j'ai passé beaucoup de temps avec Perrin, Langevin et Madame Curie (*wo ich viel mit Perrin, Langevin und Frau Curie zusammen war*), et j'ai été enchanté de ces gens (*und von diesen Leuten ganz entzückt bin*)"⁴⁷. C'est en particulier à ce Conseil Solvay qu'il avait pu se rendre compte du degré de précision et de sûreté de la détermination expérimentale par Jean Perrin des dimensions moléculaires. Dans une lettre au même écrite quelques jours plus tard, Einstein redisait sa satisfaction : "C'était très intéressant à Bruxelles (*in Brüssel war es höchst interessant*). En plus des Français [Marie] Curie, [Paul] Langevin, [Jean] Perrin, [Marcel] Brillouin, [Henri] Poincaré, et des Allemands [Walther] Nernst, [Heinrich] Rubens, [Emil] Warburg, [Arnold] Sommerfeld, il y avait aussi [Ernest] Rutherford et [James] Jeans. Et, bien sûr, H.A. [Heinrich Antoon] Lorentz et Kammerling Onnes"⁴⁸.

Des Français, il avait surtout fréquenté Marie Curie, Paul Langevin et Jean Perrin, comme on le voit à la lettre précédente (et il poursuivrait avec eux par

hostilité à la théorie d'Einstein (Paty [1987]), alors qu'il devait seulement estimer qu'elle était trop radicale ; il devait bien considérer qu'elle convergeait avec la sienne (cf. Paty [1996a]).

⁴⁶ Cela n'était pas le cas, bien entendu, de tous les physiciens, notamment des spécialistes de domaines plus classiques (voir, sur la question de la réception de la théorie de la relativité : Glick [1987], Paty [1987]).

⁴⁷ Einstein, lettre à Heinrich Zangger, 7 nov. 1911, in Einstein (CP), vol. 5, p. 219-220. Dans cette lettre, Einstein exprime en particulier la meilleure opinion de Marie Curie, contre laquelle la presse française d'extrême-droite, xénophobe, était alors déchaînée, étalant publiquement et de manière ordurière sa liaison avec Paul Langevin.

⁴⁸ Einstein, lettre à Heinrich Zangger, 15 nov. 1911, in Einstein (CP), vol. 5, p. 219-220. A Ernest Solvay, le mécène de l'organisation des Conseils, Einstein écrivait, en date du 22 novembre : "Le Congrès Solvay restera toujours l'un des plus beaux souvenirs de ma vie" (Einstein (CP), vol. 5, p. 358).

la suite des relations d'étroite amitié), alors que Poincaré⁴⁹ lui fut apparemment plus distant. Il trouva que ce dernier, dans ses commentaires lors des discussions du Conseil après les exposés, “avait une attitude générale de refus” (littéralement : “Poincaré était d'une manière générale tout simplement négatif (*Poincaré war einfach ablehnend*)”). “Malgré toute sa perspicacité (*Schaftsinn*)”, ajoute-t-il, “il manifestait peu de compréhension (*wenig Verständniss*) de la situation”. Einstein se plaignait aussi de Planck (oublié dans la liste à son correspondant, mais sans doute parce qu'il le connaissait déjà bien), qui “s'obstine dans une opinion préconçue complètement fautive (*ist verrant in einige ohne Zweifel falsche vorgefasste Meinungen*)”⁵⁰.

Il leur opposait en contrepoint la figure de Lorentz, décrite comme “une merveille d'intelligence, de finesse et de tact”, “une vivante œuvre d'art”, et comme, “à [son] avis, le plus intelligent de tous les théoriciens présents [au Conseil]”. (Lorentz dont on sait qu'il n'avait pas accepté alors complètement la relativité restreinte au sens d'Einstein, tout en appréciant hautement la valeur du jeune savant).

Dans une lettre à l'ami Michele Besso, Einstein écrivait aussi, quelque temps après la réunion du Conseil : “Je n'ai pas avancé dans la théorie des électrons [C'est évidemment de la théorie quantique qu'il s'agit, MP]. A Bruxelles également on a constaté avec consternation l'échec de la théorie, sans trouver de remède. Ce congrès avait tout l'aspect d'une lamentation sur les ruines de Jérusalem. Il n'en est rien sorti de positif. Mes interventions chancelantes ont soulevé un grand intérêt et aucune critique sérieuse. J'en ai peu profité, car tout ce que j'ai entendu m'était connu”. Cette impression, qui semble contrebalancer la précédente, confiée à Zangger, ne la contredit pas cependant. La première faisait surtout allusion à la qualité scientifique et humaine du Congrès - à cet égard, Einstein en fut enchanté -, alors que la seconde, confiée à Besso, l'ami intime et “caisse de résonance” de ses idées, portait sur les avancées acquises à la réunion sur le plan scientifique.

Du point de vue de la problématique d'Einstein, rien de nouveau n'était apparu à cet égard, et il s'en montrait déçu. Si, cependant, on considère le Congrès du point de vue de la communauté des scientifiques (aussi bien que du point de vue historique, après coup), on peut bien dire qu'il aura été marquant en ceci qu'aucune solution dans une direction autre que celle qu'avait adoptée Einstein n'y fut présentée : ou, autrement dit, que le Conseil Sovay de 1911 aura constaté l'absence d'alternative possible à une voie radicale pour la physique quantique, à la rupture avec la physique classique dont la nécessité avait déjà été diagnostiquée précédemment par Einstein lui-même.

Poincaré et l'hypothèse des quanta

Tout bien considéré, la déception éprouvée par Einstein de l'attitude «hypercritique» de Poincaré n'aura été qu'un sentiment subjectif. Ce dernier avait été sans aucun doute invité au Conseil pour y exercer, précisément, cet esprit critique qu'il avait régulièrement mis en œuvre dans son examen des théories

⁴⁹ Dont il orthographiait cavalièrement le nom, dans ces lettres, en “Poinkaré”.

⁵⁰ Encore que, dans la lettre précédente au même, il se soit flatté d'avoir réussi à convaincre Planck de sa conception sur les quanta.

physiques, que ce soit en électrodynamique avec Lorentz, en thermodynamique ou dans d'autres domaines. Il l'avait manifesté à Bruxelles par ses remarques après divers exposés, y compris celui d'Einstein. Mais il le porta ensuite à son terme en reprenant, une fois rentré à Paris, l'examen du problème des quanta de rayonnement, qui était nouveau pour lui puisqu'il n'en avait eu connaissance qu'au moment du Conseil Solvay. Il fit les calculs des différentes manières de parvenir à l'équilibre thermique dans le rayonnement du corps noir, et démontra que les problèmes du rayonnement ne pouvaient être traités par l'approche classique des équations différentielles pour des variables continues : il n'était pas possible de faire l'économie des discontinuités, d'éviter la quantification de l'énergie échangée entre le rayonnement et la matière⁵¹, contrairement à ce que Planck espérait encore. Avant lui Einstein et Ehrenfest étaient parvenus à la même conclusion, mais sans être entendus, et ce fut le résultat de Poincaré qui marqua l'adhésion générale des physiciens au «quantum d'action». Poincaré publia ces résultats quelque temps après sous le titre «Sur la théorie des quanta», d'abord comme présentation devant l'Académie des sciences, en date du 4 décembre 1911, puis sous une forme plus étendue et plus complète avec les détails des calculs dans le *Journal de physique théorique et appliquée*⁵². Sa conclusion est nette : “J'ai donc cherché si l'on ne pouvait pas rendre compte de la loi de Planck par d'autres hypothèses et je suis arrivé à un résultat négatif” ; et ce résultat “exclut la possibilité de représenter les phénomènes par des équations différentielles”⁵³.

Il donna aussi un article de vulgarisation dans la *Revue scientifique*, qui parut en février 1912, mais qu'il avait rédigé juste au retour du Conseil Solvay, avant d'obtenir les résultats indiqués⁵⁴. Il parla également de ce travail dans une conférence prononcée devant la Société Française de Physique le 11 avril 1912 et publiée sous le titre «Les rapports de la matière et de l'éther»⁵⁵. C'est dans l'article scientifique détaillé et dans cette dernière conférence que Poincaré mentionne les travaux d'Einstein sur les quanta, pour son étude des chaleurs spécifiques⁵⁶ et pour son calcul de l'action de la lumière sur les molécules, retrouvant la loi de Rayleigh⁵⁷.

Par sa conclusion sur le caractère inévitable de l'hypothèse des quanta, qui fit dès lors autorité, Poincaré conforta en fait la voie d'Einstein - du moins partiellement, car son travail concernait les échanges entre la matière et le rayonnement et non pas explicitement le rayonnement lui-même comme chez Einstein. Cependant, parler d'une irréductible discontinuité dans les échanges entre les corps et le rayonnement qu'ils émettent et absorbent, sans possibilité de revenir à des équations différentielles continues, cela impliquait une limitation fondamentale

⁵¹ Poincaré indiqua ce résultat dans une note ajoutée à la retranscription de son intervention dans le débat du Conseil (*ibid.*, p. 452).

⁵² Poincaré [1911, 1912b].

⁵³ Poincaré [1911b]1991, p. 219, 224.

⁵⁴ Poincaré [1912a]1913. On notera que Poincaré y indique pourquoi, dans la prise en compte des interférences dans le calcul du rayonnement thermique à l'équilibre, “c'est donc bien chaque quantum qui interfère avec lui-même” (p. 180) ; voir aussi Poincaré [1912c], p. 219.

⁵⁵ Poincaré [1912c].

⁵⁶ Poincaré [1912b]. Poincaré mentionne aussi ces travaux sur les chaleurs spécifiques, mais sans citer le nom de leur auteur, dans son article vulgarisé (Poincaré [1912a]).

⁵⁷ Poincaré [1912c]1913, p. 216.

de l'électrodynamique classique, comme Poincaré le vit bien, et donc de la théorie classique du rayonnement lui-même.

Einstein aurait donc pu se féliciter plus tard, rétrospectivement, de l'«esprit hypercritique» de Poincaré. Il reste vrai que ce dernier n'était pas allé, ce faisant, au-delà de ce à quoi lui-même avait conclu plusieurs années auparavant. Quant à lui, il était déjà reparti en avant dans l'élaboration d'une théorie quantique de la matière et du rayonnement, susceptible de remplacer les théories classiques (la mécanique et l'électromagnétisme), à laquelle il donnerait une première forme cohérente en 1916⁵⁸.

3.

NOUVEAUX INTERETS ET CONVERGENCES

Poincaré et la physique d'Einstein

Au sujet de la théorie de la relativité restreinte ou, dans les termes de Poincaré, de la «mécanique nouvelle», s'il est vrai que ce dernier n'a pas prononcé le nom d'Einstein, sauf sans doute à la conférence donnée à Berlin comme nous l'avons rapporté plus haut, il est possible de déceler une évolution de ses idées, qui transparaît clairement dans des articles de 1909 et de 1912⁵⁹. Cette évolution aura dans doute été occasionnée davantage à travers Minkowski et Langevin que directement à travers la lecture d'articles d'Einstein ; elle s'est effectuée, en tout cas, dans une direction qui le rapprochait des conceptions d'Einstein sur la signification de l'espace et du temps dans la «nouvelle mécanique», même s'il continuait de rapporter celle-ci à Lorentz.

On peut cependant concevoir que, aux yeux de Poincaré, la manière de voir d'Einstein restait insatisfaisante d'un point de vue physique, en ce qu'elle mettait la dynamique au second plan. La théorie «du principe de relativité» d'Einstein (et sa formalisation mathématique par Minkowski) était une théorie de l'espace-temps sans les corps, et Poincaré ne concevait pas, pour sa part, un tel espace(-temps) sans les corps comme objet d'étude de la physique, puisque l'espace n'avait, selon lui, de sens qu'en rapport aux corps, par lesquels il est déterminé et conçu. En fait, Einstein lui-même était conscient - il le fut très peu de temps après l'élaboration de la relativité restreinte, dès 1907⁶⁰ - d'un défaut inhérent à sa théorie de la relativité restreinte, qu'il exprimait comme un retour à l'espace-temps absolu, indépendant de la matière ; ce fut l'une de ses motivations pour dépasser la relativité restreinte et les mouvements d'inertie en proposant la généralisation du principe de relativité à tous les mouvements et pour prendre en compte la dynamique des champs de gravitation. Il s'appuya sur l'idée de Mach d'une «relativité de l'inertie» qu'il hypostasie en «covariance générale»⁶¹.

⁵⁸ Einstein [1916].

⁵⁹ Poincaré [1909, 1912c]. Voir notre étude sur «Poincaré et le principe de relativité» (Paty [1996]).

⁶⁰ Einstein [1907c].

⁶¹ Voir Paty [1993], chap. 5.

Quoiqu'il en soit, Poincaré fut impressionné par la personnalité d'Einstein, dont il fit un vif éloge dans une lettre de recommandation à Pierre Weiss, alors professeur à Zurich, et qui devait rejoindre l'Université de Strasbourg après la première guerre mondiale : “M. Einstein est un des esprits les plus originaux que j'aie connus ; malgré sa jeunesse, il a déjà pris un rang très honorable parmi les premiers savants de son temps”. “Ce que nous devons surtout admirer en lui”, poursuivait Poincaré dans sa lettre, “c'est la facilité avec laquelle il s'adapte aux conceptions nouvelles et sait en tirer toutes les conséquences. Il ne reste pas attaché aux principes classiques et, en présence d'un problème de physique, est prompt à envisager toutes les possibilités. Cela se traduit immédiatement dans son esprit par la prévision de phénomènes nouveaux, susceptibles d'être un jour vérifiés par l'expérience. Je ne veux pas dire que toutes ces prévisions résisteront au contrôle de l'expérience le jour où ce contrôle deviendra possible. Comme il cherche dans toutes les directions, on doit au contraire s'attendre à ce que la plupart des voies dans lesquelles il s'engage soient des impasses [*sic*] ; mais on doit en même temps espérer que l'une des directions qu'il a indiquées soit la bonne, et cela suffit. C'est bien ainsi qu'on doit procéder. Le rôle de la physique mathématique est de bien poser les questions, ce n'est que l'expérience qui peut les résoudre”⁶².

Poincaré mourut l'année suivante, trop tôt pour connaître mieux l'auteur de la théorie de la relativité générale dont ce dernier ne faisait encore qu'esquisser les contours. Ce n'est pas se hasarder beaucoup de penser que Poincaré aurait accueilli favorablement cette théorie qui présentait tous les traits d'une physique mathématique et théorique, dans le sens qu'il prônait lui-même⁶³, et qui, par ailleurs, retrouvait les idées de Riemann sur la géométrie. De son côté, Einstein allait découvrir peu après la force heuristique d'un formalisme mathématique qu'il avait eu jusqu'alors plutôt tendance à négliger, et s'y convertir, y trouvant la voie de la solution au problème de la gravitation. Cette nouvelle attitude envers la part mathématique «formelle» du travail en physique le rapprocherait du mouvement de la pensée de Poincaré, orienté vers la recherche des «analogies mathématiques» (structurelles) et la construction d'«invariants»⁶⁴.

Einstein retrouve la pensée de Poincaré

Einstein manifesta en effet quelque temps plus tard, après qu'il eût conclu son travail sur la relativité générale (à la fin de 1915), un intérêt accru pour

⁶² Henri Poincaré, Lettre à Pierre Weiss, écrite sans doute en nov. 1911 (cf. SzZE Schulratarchiv 1911, Akten), peu de temps après le Conseil Solvay. Cette lettre est éclairante à la fois sur l'image que Poincaré se fit d'Einstein en le rencontrant au Conseil Solvay, et sur la propre pensée de Poincaré sur la physique. La lettre de recommandation se termine par ces mots d'une belle clairvoyance : “L'avenir montrera de plus en plus quelle est la valeur de M. Einstein, et l'Université qui saura s'attacher ce jeune maître est assurée d'en retirer beaucoup d'honneur”. Poincaré a probablement écrit cette lettre avant de se convaincre lui-même du caractère inévitable de l'hypothèse des quanta de lumière. Sans doute était-elle encore osée à ses yeux, d'où les expressions “il cherche dans toutes les directions”, et “on doit au contraire s'attendre à ce que la plupart des voies dans lesquelles il s'engage soient des impasses”. Plus tard, une certaine interprétation d'une déclaration d'Einstein sur l'“opportunisme épistémologique” du chercheur tendra à un portrait assez semblable à celui esquissé par Poincaré, à tort selon moi (voir Paty [1993], chapitre 8).

⁶³ Paty [1999a].

⁶⁴ Sur cet aspect de la pensée de Poincaré, voir Paty [à paraître, c].

les conceptions physico-mathématiques du savant français, et une plus grande proximité à leur égard, par l'importance du formalisme mathématique dans l'expression des problèmes physiques (ressentie par nécessité, en fait, dès 1912), par le rôle «générateur» de la formulation de grandeurs covariantes... (Poincaré en avait ouvert la route pour les transformations d'inertie à propos de la gravitation, dans son travail de 1905, «Sur la dynamique de l'électron»). Einstein s'imprégnerait dès lors aussi, sans doute plus qu'auparavant, de la pensée épistémologique de Poincaré, non seulement en ce qui concerne la question du rapport de la géométrie à la physique, posée de manière inédite par la théorie de la relativité générale dans la ligne de Riemann, mais aussi concernant la «libre construction par la pensée», la «libre création du point de vue logique» (quant à leur rapport avec les faits), des concepts et des théories physiques. Cette idée l'aiderait à préciser sa position par rapport à l'empirisme (des vues étroitement empiristes prévalaient souvent chez les physiciens d'alors, pour qui les éléments théoriques sont directement - logiquement - induits des faits donnés dans l'expérience), et à élaborer ses propres conceptions épistémologiques. Elle devait constituer, avec l'affirmation de l'adéquation de la pensée au réel, le fil directeur de sa philosophie de la connaissance, que l'on peut caractériser comme un réalisme rationaliste et critique, différent du conventionalisme de Poincaré.⁶⁵

Einstein devait marquer une grande admiration intellectuelle pour Poincaré, auquel il se référa fréquemment par la suite dans ses écrits de nature épistémologique. On en mentionnera deux exemples, chacun évocateur dans son registre. Le premier, pour être anecdotique, n'en est pas moins porteur de significations : lors de son séjour à Paris en 1922, à l'invitation de Paul Langevin et du Collège de France, à moins que ce ne soit quelque temps après à une autre occasion, Einstein écrivit un petit mot à Raymond Poincaré, présentant ses «hommages à M. le Président du Conseil et au cousin de notre grand maître Henri Poincaré»⁶⁶. L'évocation d'Henri Poincaré comme maître intellectuel est ici combinée à un salut à l'homme politique, Raymond Poincaré, son cousin, qui fut président de la République française durant la Grande Guerre de 1914-1918 : Einstein, investi pour son séjour en France, en 1922, de l'aval de Walter Rathenau, dirigeant de la jeune République de Weimar, prenait alors activement sa part dans l'effort du rapprochement entre les peuples hier en conflit, et tout d'abord en favorisant la reprise des liens scientifiques et culturels entre eux. Et l'on peut ici invoquer ce que représentait, pour la culture française comme aux yeux de la culture allemande, et aussi bien au niveau international, la haute figure de Poincaré comme penseur, mathématicien, physicien, philosophe. La référence à celui-ci comme «*notre grand maître*» exprime ici à la fois une reconnaissance personnelle et une déférence symbolique d'ample portée.

Le second exemple est le rôle qu'Einstein devait accorder plus tard à la pensée de Poincaré dans son propre débat avec le physicien et philosophe Hans Reichenbach sur les rapports entre la géométrie et la physique : c'est à Poincaré qu'il

⁶⁵ Je renvoie, sur ce point, à l'ouvrage *Einstein philosophe* (Paty [1993], chap. 8 et 9).

⁶⁶ A. Einstein à Raymond Poincaré, in Einstein [1989-1993], vol. 4, p. 256. Cette carte de visite écrite en français probablement de Paris, non datée, remonte sûrement aux années 1922-1924, où R. Poincaré fut à nouveau président du Conseil (il l'avait été une première fois en 1912-1913, avant d'être Président de la République de 1913 à 1920).

ferait tenir, dans un dialogue imaginaire, les premiers arguments en faveur du caractère non empirique de la géométrie, repris à son compte, les prolongeant par sa propre réfutation de la doctrine «vérificationniste des significations» de l'empirisme logique, en faisant état de l'indissociabilité de la géométrie et de la physique et du «holisme» de la théorie physique, lequel impliquait chez Einstein (à la différence de Duhem) la notion de «complétude»⁶⁷. Einstein soulignerait, dans ce dialogue philosophique, son “respect pour la supériorité [*Ueberlegenheit*] de Poincaré comme penseur et comme écrivain”⁶⁸.

Et encore sur la relativité restreinte, Einstein et Poincaré

Un dernier mot sur la question de la relativité restreinte et de la proximité du travail de Poincaré avec celui d'Einstein, telle que nous l'avons rappelée plus haut. Einstein n'avait probablement pas eu l'occasion de lire l'article de Poincaré paru en 1906 dans les *Rendiconti* de Palerme avant qu'Abraham Pais, son futur biographe, alors jeune physicien des quanta, élève de Niels Bohr, ne lui en prêle une copie au début des années cinquante. Il devait cependant en avoir eu une idée auparavant, sinon par les travaux de Minkowski de 1907 et 1908, chiches en citation à cet égard, du moins par l'article de synthèse du jeune Wolfgang Pauli rédigé en 1921, qui faisait pleine justice aux différentes contributions à la théorie, et en particulier à Poincaré⁶⁹. Peut-être l'avait-il oublié. Sa lecture récente raviva son souvenir, ou lui révéla le dernier apport de Poincaré qu'il avait peut-être ignoré, puisqu'il déclara, en 1953, en réponse à une invitation à Berne pour une célébration du cinquantenaire de la relativité restreinte - il la déclinait pour raisons de santé -, qu'il faudrait “aussi honorer convenablement les mérites de H. A. Lorentz et de H. Poincaré”⁷⁰.

En 1955, deux mois avant sa mort, il écrivait, dans une lettre à Carl Seelig du 19 février 1955 : “Il est hors de doute que si l'on jette un coup d'oeil rétrospectif sur son évolution, la théorie de la relativité restreinte était mûre en 1905. Lorentz avait déjà découvert que, pour l'analyse des équations de Maxwell, la transformation qui reçut par la suite son nom jouait un rôle essentiel, et *Poincaré de son côté avait pénétré plus profondément dans la nature de ces relations*. Quant à moi, je n'avais connaissance à cette époque que de l'oeuvre importante de 1895 de Lorentz (...), mais non des travaux ultérieurs de Lorentz et pas davantage des recherches consécutives de Poincaré. Dans ce sens mon travail de 1905 est indépendant”⁷¹. Einstein aurait donc peut-être bien connu le travail de Poincaré de 1905 à un certain moment, bien après avoir élaboré sa propre théorie.

Langevin, la physique quantique et les probabilités

Quant à Langevin, les discussions du Conseil Solvay lui furent l'occasion de se pencher de plus près sur les quanta, et de les incorporer dans ses

⁶⁷ Sur cette question, voir Paty [1993a], chap. 7, p. 336-342.

⁶⁸ Einstein [1949].

⁶⁹ Pauli [1921].

⁷⁰ A. Einstein, lettre à André Mercier, 9 novembre 1953, citée par Pais [1982], p. 171.

⁷¹ Einstein 1955, cité par Kahan 1959, p. 163. C'est moi, M.P., qui souligne.

considérations sur les phénomènes du rayonnement et du magnétisme. Son cours du Collège de France, en 1912-1913, porta précisément sur ces questions, et il encouragea son élève et assistant, Edmond Bauer, qui en avait fait le sujet de sa thèse dès 1908, à les approfondir (Bauer la soutint en 1912)⁷². Plus tard, Langevin, donnerait une contribution sur le «facteur de Thomas» dans la précession des électrons atomiques, qui fut incluse dans un travail de Sommerfeld⁷³. Et il prendrait aussi sa part dans les discussions sur l'interprétation de la physique quantique, tenant une position pour ainsi dire intermédiaire entre Einstein et Bohr, défendant un réalisme adapté et un «déterminisme probabiliste»⁷⁴.

Les évocations qui précèdent nous montrent un Poincaré et un Langevin se prenant d'intérêt, chacun à sa manière, pour les nouvelles notions quantiques encore dans la phase préliminaire de leur élaboration, s'interrogeant sur ce qui en faisait la particularité et sur leur caractère de rupture avec la physique classique, tant l'électrodynamique que la mécanique statistique. Langevin mettait l'accent sur le caractère probabiliste tandis que Poincaré concluait à l'abandon nécessaire du traitement théorique par des équations différentielles, à variables continues, qui s'était imposé dans tous les autres domaines de la physique. Ces deux traits correspondent, effectivement, à la rupture théorique impliquée par les phénomènes quantiques et le quantum d'action : ils touchent à ses fondements conceptuels, dont les physiciens étaient cependant encore, à l'époque, bien loin de se faire une idée nette.

Langevin fut immédiatement conscient de ce que la physique quantique donnait aux probabilités un nouveau statut pour la physique, convergeant en cela avec les autres directions de la physique nouvelle, physique des ions, atomistique, physique des électrons, radioactivité, rayonnement. Il en esquissa un tableau d'ensemble dans la conférence donnée à la Société Française de Physique en novembre 1913, «La physique du discontinu», que nous avons citée précédemment⁷⁵. De palliatif d'un manque de connaissance (ce qui était leur statut dans la conception laplacienne), les probabilités devenaient l'instrument nécessaire de la connaissance des phénomènes qui se situent au niveau des atomes et sont par là imperceptibles à nos sens. Elles constituaient à ses yeux un outil théorique au même titre qu'une théorie physique à proprement parler, et ce d'autant que l'on pouvait considérer des probabilités continues, fonction, par exemple, de la variable temps, comme dans la loi des désintégrations radioactives, ou dans la théorie du rayonnement et plus généralement en thermodynamique en suivant l'interprétation fréquentielle d'Einstein. Les probabilités continues, avec les fluctuations qui en sont le corollaire, constituaient à ses yeux l'approche théorique spécifique des phénomènes discontinus. On peut dire, en ce sens, que Langevin se donnait déjà une conception objective des probabilités, bien avant que cette idée ne vienne en débat avec la mécanique quantique.

Langevin avait donc saisi très tôt l'un des aspects les plus profonds et les plus novateurs des nouvelles idées quantiques, en mettant d'emblée l'accent sur la question des probabilités et sur leur rôle central dans la théorie physique. Ce devait

⁷² Bauer [1912].

⁷³ Langevin [1931b].

⁷⁴ Voir, notamment, Langevin [1934]. Cf. Paty [1988], Freire [1993].

⁷⁵ Langevin [1913b].

être un trait constant de sa réflexion propre sur la spécificité du domaine quantique, dont une mesure plus complète serait prise après l'établissement de la mécanique quantique (nonobstant, durant longtemps encore, de grandes obscurités d'interprétation, notamment en ce qui concerne le rapport entre probabilités et statistiques et la notion d'événement ou de système physique individuel dans ce domaine).

Cette perspicacité sur le rôle théorique des probabilités en physique, acquise ainsi très tôt, sans doute en raison de sa conscience de la nouveauté et de l'unité du nouveau domaine de la physique, exprimée dès sa conférence de 1904 sur «La physique de l'électron», le préparait à comprendre mieux que beaucoup d'autres les perspectives, à première vue différentes des vues traditionnelles, offertes par la mécanique quantique sur les probabilités. On opposa celles-ci aux probabilités selon la physique classique, y compris dans le sens de la «nouvelle physique» dont nous avons parlé, dont la signification était assimilée à la conception laplacienne. Les probabilités de la mécanique quantique, irréductibles (comme le quantum d'action), étaient vues comme signalant la fin de l'idéal déterministe et réaliste pour la physique. Mais Langevin y voyait, quant à lui, le même outil de pénétration du réel physique, à condition de prendre conscience de la nécessité de concevoir un déterminisme différent de l'ancien, un «déterminisme probabiliste». Il était également préparé ainsi à réaliser immédiatement l'importance des «nouvelles statistiques quantiques», celle de Bose-Einstein et celle de Pauli-Fermi-Dirac (vers 1924-1926), et à y voir le caractère le plus fondamental des phénomènes quantiques. Et de fait nous savons, rétrospectivement, que c'est ce comportement statistique (ou probabiliste) non-classique qui se trouve à l'origine du comptage statistique particulier de Planck, dans son travail de 1900, pour les configurations de systèmes de résonateurs atomiques, comptage par lequel il fut amené à poser la discontinuité des échanges entre matière et rayonnement. Mais Planck n'en avait évidemment pas eu conscience⁷⁶.

Le sort des équations différentielles

On pourrait également reprendre le thème du traitement par les équations différentielles qui préoccupait Poincaré : les développements de la physique et de la mécanique quantiques ont abondamment confirmé depuis lors l'impossibilité d'aborder les phénomènes et les systèmes quantiques à l'aide d'équations différentielles pour des grandeurs continues, ce que nous pouvons, à vrai dire, préciser aujourd'hui de la manière suivante : des *grandeurs qui auraient le même sens* qu'en physique classique. Car, si la mécanique quantique s'est établie, malgré tout, en faisant fond sur le formalisme lagrangien-hamiltonien, notamment avec les travaux de Erwin Schrödinger, Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Paul A. Dirac, qui établirent les équations de la mécanique quantique, sous une forme différentielle, ce fut au prix de l'abandon inéluctable de la signification physique usuelle des grandeurs considérées, et même de leur forme, puisqu'elles devenaient des opérateurs agissant sur des fonctions ; et au prix de la nécessité de

⁷⁶ Ce trait, déjà indiqué dès 1911 par Natanson et Ehrenfest, était resté inaperçu des autres physiciens, jusqu'au développement des deux statistiques quantiques et aux remarques d'Einstein sur les travaux de Bose et les siens (voir, entre autres, Jammer [1966], Kastler [1983], Paty [à paraître]).

repenser complètement cette signification physique. La constatation lucide de Poincaré à la fin de 1911 (à la suite, nous l'avons dit, d'Einstein et d'Ehrenfest) posait déjà, en filigrane, sans que l'on s'en fût encore douté, la question de l'interprétation de la future théorie. Mais celle-ci n'existait pas encore : on n'avait fait que montrer sa nécessité - et son absence.

4

TROIS STYLES POUR UNE MEME PHYSIQUE

La pensée physique dans toutes ses dimensions

Poincaré, Langevin et Einstein s'intéressèrent tous trois à des domaines et à des questions sinon identiques, du moins souvent voisines. Nous considérons ici Poincaré comme physicien, ce qu'il fut pleinement, en plus de mathématicien, l'un des plus grands de son temps⁷⁷. Comme physicien, il faisait ce qu'il appelait de la «physique mathématique», où il voyait, pour sa part, deux formes d'activités qui correspondent à ce que l'on qualifierait plus couramment de *physique mathématique* proprement dite (où l'on s'attache plutôt à la forme mathématique qu'au contenu physique) et de *physique théorique* (où l'attention est portée avant tout sur les contenus physiques des concepts et grandeurs constitués mathématiquement). Einstein et Langevin pratiquaient, quant à eux, la physique théorique dans ce sens. Langevin avait fait également, au début de sa carrière, de la physique expérimentale (sur les gaz ionisés).

Ils se sentaient de plus concernés par les aspects techniques des applications de la physique, et compétents en la matière : Langevin en électricité, en technique des ions et, quelque temps après, en acoustique et ultrasons (il s'adonna à ce dernier domaine durant la première guerre mondiale et plusieurs années après, devenu grand spécialiste et inventeur en radars), Poincaré et Einstein en électrotechnique (le premier l'enseignait aux ingénieurs, le second avait passé des années à en évaluer des brevets d'invention). Dans une conversation des années vingt entre Einstein et le philosophe Emile Meyerson, ce dernier avait émis l'idée qu'Einstein en était venu à s'occuper de sujets techniques à cause de l'inflation. Mais Einstein, en lui rappelant que son premier emploi avait été celui d'«expert à l'Office des brevets suisse», lui donna une précision fort intéressante : «et même par la suite, je n'ai jamais complètement cessé de m'occuper de technique. Cela profitait aussi à mes recherches scientifiques. C'est, par exemple, l'expertise à laquelle j'avais à soumettre une boussole gyroskopique qui m'a donné l'idée de la démonstration de la nature rotatoire du paramagnétisme des atomes»⁷⁸. Ce que Meyerson transcrivait

⁷⁷ Houzel et Paty [1997], Paty [1996a, 1999a].

⁷⁸ Albert Einstein, Lettre à Emile Meyerson, 27 janvier 1930, in Einstein [1989-1993], p. 228. Le philosophe le rapporte lui-même dans un de ses ouvrages : Meyerson [1931], p. 647.

ainsi : “Les travaux techniques lui donnent le sens du réel physique qu'il tend à perdre avec le seul calcul et la manipulation des symboles”⁷⁹.

Tous les trois s'intéressaient de près aux aspects expérimentaux de la physique, se penchant dans le détail sur leurs rapport aux idées et aux travaux théoriques. Poincaré se prononçait pour la nature expérimentale de la mécanique, en se référant à la tradition anglaise, contre la tradition continentale et notamment française. Cependant il n'était pas inductionniste, et l'on peut caractériser sa position en physique comme une combinaison d'empirisme et de conventionalisme (que l'on retrouve aussi à propos des principes). Langevin était expérimentateur aussi bien que théoricien : il “se montra”, écrit Louis de Broglie, “aussi bon expérimentateur pour l'observation des faits qu'excellent théoricien pour leur interprétation”⁸⁰. Einstein le rappelle également dans le texte qu'il écrivit à l'occasion de la mort de Langevin⁸¹. John D. Bernal le voyait, à juste titre, à mi chemin de deux tendances, l’“empirisme intuitif et puissant de Rutherford et les profondes généralisations mathématiques d'Einstein”⁸². Son sens physique pénétrant allié à sa connaissance des formulations mathématiques lui faisait traduire des relations théoriques de grandeurs en termes de phénomènes physiques possibles, c'est-à-dire d'«expériences imaginaires», ou «expériences de pensée» (celles du voyageur et du boulet de Langevin sont bien connues). Ce trait était porté à un haut degré chez Einstein, dont la pensée physique intuitive s'exprimait aussi en situations concrètes, qui permettent de visualiser, pour ainsi dire, des relations abstraites de grandeurs, et de concevoir pleinement leur sens ou leur contenu physique.

Leur commun domaine à tous trois était la physique théorique, et ils se portèrent, au sein de celle-ci, sur des sujets voisins, ce qui n'a rien d'étonnant si l'on considère qu'il s'agit des problèmes de frontières où la physique se montrait en profond renouvellement : constitution atomique de la matière et propriétés statistiques (en particulier le mouvement brownien), radioactivité, physique des électrons, optique et électrodynamique des corps en mouvement avec le principe de relativité, théorie du rayonnement et hypothèse des quanta. Certains d'entre eux viennent d'être évoqués, les autres mériteraient aussi de l'être, mais nous ne pouvons être exhaustifs. La physique quantique était encore en gestation au sein de la communauté des physiciens. La relativité générale l'était aussi, mais dans la pensée d'un seul d'entre eux, Einstein, qui n'avait d'ailleurs pas encore, au moment du Conseil Solvay, explicité pleinement son problème, ni conçu comment il tenait en profondeur à la formulation mathématique qu'il devrait en donner⁸³.

Quant à la relativité restreinte, comme nous l'avons laissé entendre, elle n'était pas en cause pour les participants au Conseil qui l'acceptaient, bien qu'avec des nuances dans l'interprétation, soit sous la présentation donnée par Einstein d'une réforme de la cinématique ayant des conséquences sur la forme de la dynamique, soit comme dynamique (relativiste) électromagnétique (avec Lorentz et Poincaré, qui parlaient encore, à cette conférence, mais ils n'étaient pas les seuls, de l'éther comme milieu du rayonnement), soit encore selon une interprétation intermédiaire

⁷⁹ Meyerson [1931], p. 647.

⁸⁰ De Broglie [1947].

⁸¹ Einstein [1947].

⁸² Bernal [1947].

⁸³ Paty [1993a], chapitre 5.

(avec Langevin) pour laquelle la raison de la nouvelle cinématique devait être rapportée à la dynamique électromagnétique.

Ces «nuances» dans l'interprétation correspondaient, en fait, à des différences conceptuelles, qui sont instructives à elles seules sur la manière de *penser physiquement* de chacun de ces scientifiques. On peut, à partir de ces différences, s'essayer à caractériser les *styles scientifiques*, en matière de physique théorique ou, plus précisément, d'approche théorique de la physique, de chacun des trois savants.

Conceptions sur la théorie physique et sur l'unité de la physique

Poincaré, Langevin et Einstein étaient tous trois également convaincus de la nécessité de critiquer les conceptions de la mécanique qui se montraient désormais insuffisantes, et de les ajuster, voire de les remplacer, en fonction des nouveaux phénomènes⁸⁴. Ce fut d'abord le plus classique de ces nouveaux domaines, celui de l'électromagnétisme, qui se refusa à la réduction mécaniste : la «nouvelle mécanique» en résulta, inaugurant ce qui est devenu par la suite la théorie de la relativité, d'abord restreinte puis générale (cette dernière concernant le champ de gravitation).

Chez Poincaré, cette critique fut d'abord celle des concepts absolus de la mécanique, alors que cette science était une science expérimentale et n'impliquait aucun absolu *a priori*. Les énoncés de *La Science et l'hypothèse*, “il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs”, “il n'y a pas de temps absolu”, et “nous n'avons pas l'intuition de la simultanéité de deux événements” sont bien connus⁸⁵. Mais la mécanique, avec tous ses concepts, était à ses yeux toujours utile (et vérifiée) dans son domaine traditionnel ; la «nouvelle mécanique» ne la détrônait pas dans ce domaine, et devrait, selon lui, coexister avec elle, selon les besoins et les domaines de validité considérés. L'unité profonde des phénomènes physiques n'avait pas pour corollaire une unité théorique, ne serait-ce qu'en raison de la part de convention, de commodité à notre usage, dans l'énoncé de toute théorie, et l'on pouvait maintenir le cadre, tout en disposant de dynamiques différentes. (Les cadres ne doivent pas être brisés, ils doivent être pliés, les bonnes théories sont les théories souples, disait-il).

Quant à Langevin, il se montrait particulièrement sensible au lien que laissaient deviner entre eux les phénomènes divers de la «nouvelle physique», comme on le voit dès son exposé synthétique de 1904 à Saint-Louis sur «La physique des électrons», mais aussi à l'organisation de l'ouvrage *Ions, électrons et corpuscules*, dont il assumait la préparation avec un autre physicien français, Henri Abraham, ouvrage qui parut en 1905, et dont les deux volumes contiennent, réimprimés ou traduits, les articles de recherche considérés comme les plus importants publiés sur ces thèmes au cours des dernières années⁸⁶. (Il y avait cependant quelques manques significatifs, mais assez naturels si l'on considère l'époque, comme les articles de Planck de 1900 proposant l'hypothèse des quanta).

⁸⁴ Poincaré et Einstein avaient en outre un tour d'esprit profondément philosophique, dont leurs écrits sont la trace.

⁸⁵ Poincaré [1902].

⁸⁶ Langevin [1904], Abraham et Langevin [1905].

Par-delà une connaissance très sûre et très étendue de ces questions, il tentait de les éclairer par un point de vue systématique susceptible de faire saisir leur unité profonde et, par là, de renouveler notre connaissance de la matière. Le renouveau fondamental qui lui semblait devoir entraîner un tel changement de perspective, c'était l'évidence désormais acquise de la structure granulaire de la charge électrique et, d'une manière générale, la structure atomique de la matière. Il y voyait les bases d'une théorie unifiée (à venir) des phénomènes électromagnétiques et atomiques, qui étaient pour l'instant considérés séparément selon la diversité de leurs manifestations.

Il dessinait lui-même, dans sa conférence de Saint-Louis, le programme du changement entrevu pour cette «physique nouvelle», en le fondant sur les notions d'*électricité* et d'*atome*. Il le plaça, au début, sous le signe de la «conception électromagnétique du monde», mais il devait par la suite modifier ce point de vue⁸⁷, en fonction sans doute des nouvelles perspectives survenues quelque temps après le Conseil Solvay : la *discontinuité quantique* et la *relativité générale*. Dans la première phase, une différence de son programme par rapport à celui de Poincaré (ainsi que de Lorentz) était la prééminence du point de vue électromagnétique sur celui de la mécanique, avec lequel il n'avait pas besoin de se concilier, et les notions de la mécanique n'apparaissent que comme des notions dérivées, issues du premier, dans certaines conditions d'approximation.

Malgré sa conception unitaire sur la physique, Langevin ne présentait la synthèse théorique entrevue que comme un programme à accomplir. Son attitude de théoricien «phénoménologue», très proche des données de l'expérience, ne lui faisait pas un devoir de viser d'emblée, par un souci formel immédiat, une théorie complète : il travaillait plutôt par élaboration de modèles (de l'électron déformable, du magnétisme). Sa conception de la théorie était ouverte (parce qu'inachevée), ce qui lui donna, davantage qu'aux autres pionniers de l'électrodynamique, une liberté d'esprit pour entrer dans les nouvelles vues proposées par Einstein. Sans doute reconnut-il d'abord, dans l'approche théorique de ce dernier, le résultat sur la dynamique (avec l'inertie de l'énergie), proche de ses propres contributions, qui l'amena directement à considérer la réforme de la cinématique par la modification directe des concepts de l'espace et du temps (rendus *physiques*).

Langevin maintint cependant, dans sa conception de la théorie physique, jusqu'à la relativité générale, l'idée d'une prééminence de la dynamique, que l'on trouve aussi chez Poincaré, et qui continua d'imprégner ses recherches sur l'«inertie électromagnétique». Et Poincaré, qui avait porté assez loin sa critique de l'espace et du temps absolus newtoniens ainsi que de la simultanéité absolue⁸⁸, ne l'avait cependant pas particularisée ni mise en valeur dans sa théorie dynamique de l'électron. Sans doute parce qu'il ne s'arrêtait pas à la considération de ces notions sans les corps auxquels les rapporter, et qu'il les considérait comme secondes, du point de vue de la physique, par rapport à la dynamique⁸⁹.

⁸⁷ En 1912, dans sa conférence à la Société Française de Physique sur «Les grains d'électricité et la dynamique électromagnétique», Langevin proposait encore de prendre les lois électromagnétiques comme base d'explication pour la physique, notamment pour la mécanique (Langevin [1912a]1923, p. 162).

⁸⁸ Voir les chapitres sur la physique dans Poincaré [1902] et sur la mesure du temps dans Poincaré [1905a].

⁸⁹ Paty [1992], [1993a], chap. 6, [1996a].

A cet égard, la théorie de la relativité restreinte d'Einstein représentait une sorte d'anomalie par rapport aux conceptions habituelles de la physique, puisqu'elle portait sur *un objet qui n'était pas une dynamique* donnée, mais *une condition* sur toute dynamique (la covariance) imposée par le caractère de *l'espace* et du *temps*. Il est vrai qu'Einstein imposait à ces derniers d'être *physiques* et, pour cela, il les soumettait à l'exigence de respecter deux *principes physiques*, qui tenaient, chacun, leur origine dans une dynamique : le principe de relativité dans la mécanique, et celui de la constance de la vitesse de la lumière (dans le vide) dans l'électromagnétisme. L'anomalie serait réparée par la relativité générale, qui fait de la dynamique de la gravitation une théorie de l'espace-temps. Mais, dans les deux cas, le trait fondamental de la méthode théorique demeurerait, à savoir : ramener une dynamique donnée à son principe fondamental (ou ses principes fondamentaux, à l'image de la thermodynamique), et formuler la théorie physique en la *fondant sur ces principes* fondamentaux.

Einstein se proposait également, dans ses recherches, une perspective d'ensemble sur les propriétés de la matière, mais sa méthode était autre que la «pensée méthodologique de l'unité» de Langevin : il abordait séparément les problèmes en fonction de leur spécificité, déterminait, pour ainsi dire, une théorie par son objet, c'est-à-dire un domaine bien déterminé de phénomènes. C'est ainsi qu'il aborda séparément trois problèmes que Langevin, au même moment, considérait ensemble : les mouvements moléculaires (et le mouvement brownien), le rayonnement lumineux, l'électrodynamique. Cette différenciation théorique apparaît, retrospectivement, comme le trait le plus caractéristique du «style» scientifique d'Einstein dans son travail de physicien. A cet égard, Einstein et Poincaré seraient plus proches l'un de l'autre que de Langevin, à ceci près qu'Einstein pensait que l'on doit tendre vers une théorie unique et qu'il existe toujours une théorie meilleurs que les autres pour un domaine donné. La pensée théorique d'Einstein en physique est, en quelque sorte, une pensée de la stricte adéquation de la théorie et de son objet : c'est là un trait permanent de son style, affirmé dans son épistémologie, et que l'on peut suivre de ses premières à ses dernières recherches⁹⁰.

Les principes physiques

Quant à la place des principes dans la théorie, on peut ici encore noter des parentés et des différences. Pour les parentés : il n'est pas de théorie sans principes, qui s'expriment *par les relations* entre les grandeurs ; ces *principes physiques* sont d'origine «expérimentale», «empirique», «factuelle», et portés au rang de proposition générale. Les différences apparaissent déjà dans la manière dont on y parvient. C'est, pour Langevin, par *induction* à partir des faits d'expérience, et il est impératif de respecter leur domaine de validité, sans extension abusive. Les principes sont alors des propriétés fondamentales qui servent de base aux théories, qu'ils résument en quelque sorte, et ils expriment la portée de ces dernières. Ils servent aussi de guides heuristiques pour connaître certaines propriétés des systèmes étudiés (ainsi du principe de symétrie introduit par Pierre Curie)⁹¹.

⁹⁰ Paty [2000a].

⁹¹ Langevin [1904b].

Pour Poincaré, les principes, dont l'origine est empirique, sont choisis par la pensée, tels les principes de la mécanique. C'est dans ce sens que Poincaré parla pour la première fois, en 1904, de principe de relativité au sens de la relativité restreinte, sans toutefois être sûr encore s'il n'était valable que pour les corps de la mécanique, ou s'il s'étendait aux systèmes «corps-éther», c'est-à-dire à l'électrodynamique. A ses yeux, le couronnement de la mécanique fut sa formulation par Lagrange et Hamilton, qui en énonce les principes et en donne les équations. Tel est le modèle de toute physique mathématique, qui doit pouvoir être exprimée de cette manière. Les principes peuvent apparaître comme conséquences d'hypothèses de départ dans la théorie (c'est, par exemple, ce qu'il obtint en 1905, avec l'électrodynamique de Lorentz réformée : elle impliquait le principe de relativité). Ces principes couronnent la mathématisation de la théorie par les équations différentielles, la théorie accédant alors à l'état d'une *physique mathématique*. On les généralise «axiomatiquement» et ils deviennent des conventions. Ils peuvent, à leur tour, venir structurer la formalisation des théories : par exemple, le principe de relativité (pour les mouvements d'inertie) considéré pour la gravitation implique l'invariance de Lorentz du lagrangien de cette dernière : on peut modifier sur cette base la théorie de Newton (encore insuffisamment)⁹².

Pour Einstein, les principes sont des guides heuristiques pour la construction théorique. Mais, aussi, ils résument ce que les théories ont d'essentiel, qui demeurera par-delà leurs modifications si elles sont insatisfaisantes à divers égards. Dans les «théories à principes», qui sont, à ses yeux, le type de théories le plus fondamental, ces principes, une fois qu'on aura su les reconnaître (par une pensée plus intuitive qu'analytique), ils viennent structurer d'emblée la construction, et lier les grandeurs, leur donnant par là-même leur contenu physique (c'est ainsi que le principe de relativité étendu à l'électromagnétisme donne à l'espace-temps son contenu physique)⁹³.

En définitive, les thèmes de recherche ou de préoccupation communs à Poincaré, Langevin et Einstein permettent de caractériser trois attitudes différentes par rapport à l'unité des phénomènes en relation à la possibilité de formuler les théories physiques, et au rôle des principes physiques. On peut les résumer comme étant celles d'une *diversité empirique pour une unité formelle* autour de principes physiques (Poincaré), d'une *unité de principe*, explorée par des principes et accomplie à l'aide de «modèles théoriques» (Langevin), d'une *pensée du rapport de la théorie et de son objet* aboutissant à une unification par les principes (Einstein).

*Electrodynamique et relativité restreinte:
Entre Poincaré et Einstein : Langevin ?*

Après cette rapide revue comparative des pensées (épistémologiques) de la théorie physique selon les trois savants, revenons, pour terminer, à la question de l'invention de la théorie de la relativité restreinte pour tenter d'y voir plus clair dans leurs approches et dans leurs compréhensions respectives.

Nous avons rappelé, à plusieurs endroits, des éléments de convergences et de différences entre les travaux de 1905 de Poincaré et d'Einstein. Langevin

⁹² Poincaré [1905c].

⁹³ Paty [1993a], chap. 4. Sur la conception einsteinienne des théories, voir Paty [1993a], chap. 9.

avait, pour sa part, repris au début le programme qui était celui de Lorentz et de Poincaré, et il le transforma ensuite dans un sens conforme à celui d'Einstein. Son adhésion immédiate à la théorie de la relativité au sens de ce dernier est d'autant plus remarquable que son propre programme, orienté vers la dynamique, était plus proche de celui de Lorentz et Poincaré. Sa position, toutefois, était originale, en particulier dans sa généralisation de l'inertie de l'énergie, et cette originalité nous permet de comprendre comment, d'un programme initialement très voisin de celui de Lorentz et de Poincaré, il était possible de passer à une pleine compréhension de la relativité au sens d'Einstein et de combler ainsi le hiatus entre les deux conceptions.

Quant à la relativité au sens d'Einstein, on peut la résumer en empruntant les mots mêmes de ce dernier. Dans une évocation de son travail de 1905 et de ses antécédents, il met très exactement le doigt sur ce qui faisait la nouveauté de son mémoire : "C'est d'avoir découvert le fait que la portée de la transformation de Lorentz transcendait sa connexion avec les équations de Maxwell et mettait en cause la nature de l'espace et du temps en général. Ce qui était également nouveau, c'est que l'invariance de Lorentz est une condition générale pour toute théorie physique"⁹⁴.

La position de Langevin était en quelque sorte intermédiaire entre celle de Poincaré et celle d'Einstein ; connaissant sa proximité tant avec le travail du premier, qu'il connaissait de près, qu'avec celui du second, qu'il adopta, on est tenté de se demander s'il n'a pas, en définitive, contribué à rapprocher Poincaré du point de vue d'Einstein (rapprochement qu'il est possible de caractériser en fin de parcours, vers 1909-1912⁹⁵). Nous ignorons tout, cependant, des éventuelles tentatives ou conversations qui auront pu favoriser un tel rapprochement. Il nous faut nous contenter de l'article de Langevin sur Poincaré et son œuvre en physique, rédigé après la mort de ce dernier et paru en 1913, pour y chercher quelque indice.

Dans cet article, Langevin décrit les contributions de Poincaré à la relativité, mais ne dit rien de la différence entre les conceptions d'Einstein et celles de Poincaré. Il y a même tendance à interpréter les apports de ce dernier dans un sens einsteinien - c'est-à-dire selon sa propre compréhension. Il écrit : "Henri Poincaré arrivait en même temps au même résultat [qu'Einstein] en suivant une voie différente, son attention ayant été attirée surtout par la forme imparfaite sous laquelle se présentaient les formules de transformation telles que les avaient données Lorentz. Il se préoccupa en même temps, familier de la théorie des groupes, de trouver les invariants de la transformation [de Lorentz], les éléments qu'elle laisse inaltérés et grâce auxquels il est possible d'énoncer toutes les lois de la physique sous une forme indépendante du système de référence"⁹⁶. Langevin souligne également, comme apports de Poincaré, l'intégrale d'action hamiltonienne, qui permet de résumer "dans un principe de moindre action plus général que celui de la mécanique ordinaire l'ensemble des lois de l'électromagnétisme et de la dynamique nouvelle", la «pression de Poincaré», la modification (relativiste) de la loi de la gravitation⁹⁷. Langevin devait déclarer plus tard, en 1922, que la théorie de

⁹⁴ Voir Paty [1993a], chap. 3.

⁹⁵ Paty [1996a].

⁹⁶ Langevin [1913c].

⁹⁷ Langevin [1913c].

la relativité “s'appuie sur les idées de Henri Poincaré et les travaux d'Einstein convergent avec les siens”⁹⁸.

Il est fort probable, en définitive, que Langevin n'ait pas vécu comme une opposition ou un conflit la différence des approches de l'électrodynamique des corps en mouvement de Poincaré et d'Einstein, mais simplement comme deux contributions parallèles. C'était probablement ce que pensaient aussi la plupart des physiciens connaissant le domaine. Langevin trouva dans la théorie d'Einstein une structure théorique plus convaincante, ainsi qu'une reconstruction explicite des concepts d'espace et de temps qui était absente chez Poincaré. Et, sans doute, ces deux approches si apparentées, malgré leur différence, ne furent-elles perçues comme en opposition que bien plus tard, par des regards rétrospectifs croyant devoir juger du passé à l'aune de la connaissance ultérieure. La théorie de la relativité «sanctionnée», comme aurait dit Gaston Bachelard, était identifiée à la théorie d'Einstein et à l'approche propre de ce dernier (à des reconstructions ou approximations près, dont on ne parlera pas ici), notamment parce que c'est cette approche qui avait conduit à la relativité générale, ce qui est exact ; mais, dès lors, la contemporanéité d'autres contributions, même significatives, était effacée, par une mutilation de l'histoire, et une rigidification de ce qui avait été une *création scientifique*, liée à un *style* particulier, en une norme méthodologique, impersonnelle, dogmatique et infondée, pour porter des jugements de vérité et d'erreur. Ainsi s'engendrent des vues anhistoriques de la science et de faux problèmes en histoire des sciences.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abraham, Henri et Langevin, Paul (éds.) [1905]. *Les quantités élémentaires d'électricité. Ions, électrons, corpuscules. Mémoires réunis par H. A. et P. L.*, Gauthier-Villars, Paris, 1905. (2^e série de la Collection de mémoires relatifs à la physique, sous l'égide de la Société Française de Physique).

Bauer, Edmond [1912]. *Recherches sur le rayonnement*, Thèse de doctorat ès-sciences physiques, Université de Paris, 1912, 207 p.

Bauer, Edmond [1956]. Souvenirs sur Paul Langevin, *Les Cahiers rationalistes* n°11, 25 nov. 1956, 167-170.

Bensaude-Vincent, Bernadette [1987]. *Langevin. Science et vigilance*, Belin, Paris, 1987.

Bernal, John D. [1947]. Langevin et l'Angleterre, *La Pensée*, n°12, mai-juin 1947, 17 et suiv.

Biezunski, Michel [1991]. *Einstein à Paris*, Presses Universitaires de Vincennes, Saint Denis (Fr), 1991.

de Broglie, Louis [1924]. *Recherches sur la théorie des quanta*, Thèse, Paris, 1924 ; *Annales de physique*, 10^e série, 3, 1925, 22-128; ré-éd., Masson, Paris, 1963.

⁹⁸ Interrogé par l'astronome Charles Nordmann, lors de la venue d'Einstein à Paris (Entrevue au *Matin*, 23 mars 1932, cité dans Biezunski [1991]).

de Broglie, Louis [1947]. Notice sur la vie et l'œuvre de P. Langevin, lecture faite à l'Académie des sciences, 15 déc. 1947, repris dans L. de B., *Savants et découvertes*, Albin Michel, Paris, 1951, p. 233-269.

de Broglie, Maurice et Langevin, Paul (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. Sur l'édition en allemand, voir : Eucken [1914].

Brunschvicg, Léon ; Hadamard, Jacques ; Lebeuf, A. & Langevin, Paul, *L'Oeuvre de Henri Poincaré*, Supplément à la *Revue de métaphysique et de morale* 21, 1913, n° 5 (septembre), 584-718.

Bücherer, Alfred [1904]. *Mathematische Einführung und die Elektronentheorie*, Teubner, Leipzig, 104.

Einstein, Albert [1905a]. *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (Inaugural Dissertation, Zürich Universität), Wyss, Bern, 1905. Repris avec des compléments in *Annalen der Physik*, ser. 4, XIX, 1906, 289-306 ; repr. in CP, vol. 2, p.. Correction : ser. 4, XXXIV, 1911, 591-592. Trad. angl. : A new determination of molecular dimensions, in trad. angl. de CP2, p. 180-190.

Einstein, Albert [1905b]. Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 132-148. Trad. fr. : Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 39-53.

Einstein, Albert [1905c]. Ueber die von der molekular kinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 549-560. Trad. fr. : Mouvement des particules en suspension dans un fluide au repos impliqué par la théorie moléculaire cinétique de la chaleur, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 55-64.

Einstein, Albert [1905d]. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-921 ; repr. in CP, vol. 2, p. 5-52. Tr. fr. : Sur l'électrodynamique des corps en mouvement, in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 31-58.

Einstein, Albert [1905e]. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVIII, 1905, 639-641. Trad. fr. : L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?, in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 60-62.

Einstein, Albert [1905f]. [Compte-rendu de] P. Langevin. Ueber eine fundamental Formel der kinetischen Gastheorie (CR 140, 535-538, 1905), *Bleitblätter zu der Annalen der Physik* 29, 1905, 640-641 ; repr. in CP, vol. 2, p. 251-252 (trad. angl. CP2, p. 138-139).

Einstein, Albert [1906a]. Zur Theorie des Brownschen Bewegung, *Annalen der Physik*, ser. 4, XIX, 1906, 371-380 ; repr. in CP, vol. 2, p. 333-345. Trad. angl. : On the theory of the Brownian motion (in trad. angl. CP2, p. 180-190).

Einstein, Albert [1906b]. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption, *Annalen der Physik*, ser. 4, XX, 1906, 199-206. Trad. fr. (partielle) : Théorie de la production et de l'absorption de la lumière, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 68-72.

Einstein, Albert [1906c]. Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie, *Annalen der Physik*, ser. 4, XX, 1906, 627-633 ; repr. in Einstein, CP, vol. 2, p. 359-366. Trad. fr. : Le principe de conservation du mouvement du centre de gravité et l'inertie de l'énergie, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 63-69.

Einstein, Albert [1906d]. Ueber eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons, *Annalen der Physik*, ser. 4, XXI, 1906, 583-586 ; repr. in Einstein, CP, vol. 2, p. 367-372. Trad. fr. : Méthode pour déterminer le rapport de la masse transversale à la masse longitudinale de l'électron, *L'éclairage électrique* XLIX, 1906, 493-494.

Einstein, Albert [1907a]. Die Planck'sche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme, *Annalen der Physik*, ser. 4, XXII, 1907, 180-190 [reçu le 9 nov. 1906]; 800 (Berichtigung, erratum) ; repr. in Einstein, CP, vol. 2, p. 378-391. Trad. fr. : La théorie du rayonnement de Planck et la théorie des chaleurs spécifiques, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 75-84.

Einstein, Albert [1907b]. Ueber die Gültigkeitsgrenze des Satzes vom thermodynamischen Gleichgewicht und die Möglichkeit einer neuen Bestimmung der Elementarquanta, *Annalen der Physik*, ser. 4, XXII, 1907, 569-572 ; repr. in Einstein, CP, vol. 2, p. 392-397 ; trad. angl. : On the limit of validity of the law of thermodynamical equilibrium and on the possibility of a new determination of the elementary quanta, in trad. angl. CP2, p. 180-190, p. 225-228.

Einstein, Albert [1907c]. Ueber das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrbuch der Radioaktivität*, IV, 1907, 411-462 ; V, 1908, 98-99 (Berichtigungen, errata). Trad. fr. : Du principe de relativité et des conséquences tirées de celui-ci, in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 84-124.

Einstein, Albert [1909]. Ueber die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung, *Physikalische Zeitschrift*, X, 1909, 817-825. (Conférence de Salzbourg, 21 nov. 1909). Trad. fr. : L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 86-100.

Einstein, Albert [1912g]. Etat actuel du problème des chaleurs spécifiques, suivi de : Discussion du rapport (3 nov. 1911), in Broglie, M. et Langevin [1912], p. 407-435 (texte), 436-450 (discussion). (trad. fr. par Paul Langevin) ; repr. partiellement dans Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 120-125. Texte allemand original : Zum gegenwärtigen Stande des Problems der spezifischen Wärme, in Eucken [1914], p. 353-364, reproduit dans Einstein CP, vol. 3, p. 529-548 (texte), 549-562 (discussion).

Einstein, Albert [1916]. Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Gesellschaft Mitteilungen* (Zürich), 1916, 47-62 ; également : *Physikalische Zeitschrift* XVIII, 1917, 121-128. Trad. fr. : Théorie quantique du rayonnement, in Einstein 1989-1993, vol. 1, p. 134-147.

Einstein, Albert [1947]. Paul Langevin, *La Pensée*, nlle série, n° 12 (mai-juin) 1947, 13-14 ; égale in Einstein [1989-1993], vol. 4, p. 183. Trad. angl., Paul Langevin in *memoriam*, in Einstein [1950], p. 231-232.

Einstein, Albert [1949]. Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume, in Schilpp [1949], p. 663-693. [La traduction anglaise a été faite par P. A. Schilpp, cf. sa préface, p. xv.] Original allemand : Bemerkungen zu den in diesen bänden Vereinigten Arbeiten, in édition de Schilpp [1949] en allemand, p. 493-511. [Le texte en allemand rédigé par Einstein est daté du 1.2.1949.]

Einstein, Albert [1954]. *Ideas and Opinions*, transl. by Sonja Bergmann, Crown, New-York, 1954. Ré-éd. Laurel, New-York, 1981

Einstein, Albert [1987-1998]. *The collected papers of Albert Einstein*, éd. sous la dir. de John Stachel puis de Martin J. Klein, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987-1998. 8 vols parus (ainsi que les volumes de traduction en anglais correspondants). Indiqué : Einstein, CP.

Einstein, Albert [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud *et al.*, édition publiée sous la dir. de Françoise Balibar. Seuil/éd. du CNRS, Paris, 1989-1993, 6 vols.

Einstein, Albert & Besso, Michele [1972]. *Correspondance 1903-1955*, publiée par Pierre Speziali, Hermann, Paris, 1972. [Textes originaux et traduction en français.] Nouvelle éd., seulement trad. fr., 1979.

Einstein, Albert & Langevin, Paul [1972c]. [Correspondance], in Langevin, Luce : Paul Langevin et Albert Einstein d'après une correspondance et des documents inédits, *La Pensée*, n° 161, janvier-février 1972, 3-40. (Voir également Einstein [1989-1993], vol. 4).

Eucken, Arnold (ed.) [1914]. *Die Theorie der Strahlung und der Quanten. Verhandlungen auf einer von E. Solvay einberufenen Zusammenkunft (30 Oktober bis 3 November 1911), mit einem Anhang über die Entwicklung der Quantentheorie vom Herbst 1911 bis Sommer 1913*. Knapp, Halle a.S., 1914 (Abhandlungen der Deutsche Bunsen Gesellschaft für angewandte physikalische Chemie, vol. 3, n°7). (Sur l'ouvrage correspondant en français, voir : de Broglie, M. et Langevin [1912].

Freire, Olival [1993]. L'interprétation de la mécanique quantique selon Paul Langevin, *La Pensée*, n°292, 1993, 117-134.

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

Houzel, Christian & Paty, Michel [1999]. Poincaré, Henri (1854-1912), in *Encyclopædia Universalis, Dictionnaire de l'Astronomie*, Encyclopædia Universalis/ Albin Michel, Paris, 1999, p. 696-706.

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

Jammer, Max [1966]. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Mc Graw Hill, New York, 1966 ; ré-éd., 1973.

Kahan, Théo [1959]. Sur les origines de la théorie de la relativité restreinte, *Revue d'Histoire des Sciences*, 12, 1959, 159-165.

Kastler, Alfred [1983]. On the historical development of the indistinguishability concept for microparticles, in Merwe, Alwyn van der (ed.), *Old and new questions in physics, cosmology, philosophy and theoretical biology*, Plenum press, New York, 1983, p. 607-623.

Kuhn, Thomas [1978]. *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*, Clarendon Press, New York, 1978.

Langevin, André [1971]. *Paul Langevin, mon père*, Editeurs français réunis, Paris, 1971.

Langevin, Luce [1972]. Paul Langevin et Albert Einstein d'après une correspondance et des documents inédits, *La Pensée*, n° 161, janvier-février 1972, 3-40.

Langevin, Paul [1901]. *Recherches sur les gaz ionisés*, Thèse de doctorat d'Etat, Paris, 1902. Repris dans Langevin [1950], p. 13-150.

Langevin, Paul [1904a]. La physique des électrons. (Communication présentée au Congrès international des arts et des sciences, Saint Louis, Missouri, 23 septembre 1904), *Revue générale des sciences*, 15 mars 1905. Repris dans Langevin [1923], p. 1-69.

Langevin, Paul [1904b]. L'esprit de l'enseignement scientifique, Conférence au Musée pédagogique, in Langevin [1923], p. 424-453.

Langevin, Paul [1905a]. Sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique, *Journal de physique*, 4, 1905, 165-souv. Repris dans Langevin [1950], p. 313-328.

Langevin, Paul [1905b]. Sur l'impossibilité physique de mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre, *Compte-rendus de l'Académie des sciences* (Paris), 140, 1905, 1171-1173. Repris dans Langevin [1950], p. 395-396.

Langevin, Paul [1905c]. Sur une formule fondamentale de la théorie cinétique, *Compte rendus des séances de l'Académie des sciences*, 140, 1905, 35-38.

Langevin, Paul [1905d]. Une formule fondamentale de la théorie cinétique, *Annales de Chimie et Physique*, 1905, 5, 245-288 ; repris dans Langevin [1950], p. 269-300.

Langevin, Paul [1905e]. Sur la théorie du magnétisme, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences*, 139, 1905, 1204- ; *Bulletin de la Société française de physique*, 1905, 4, 13- (20 janvier) ; *Revue générale des sciences*, 15 mars 1905.

Langevin, Paul [1905f]. Magnétisme et théorie des électrons, *Annales de Chimie et Physique*, 1905, 5- ; 70- ; repris dans Langevin [1950], p. 331-368.

Langevin, Paul [1905g]. Sur la théorie du magnétisme, *Journal de Physique*, 4, 678;

Langevin, Paul [1908]. Sur la théorie du mouvement brownien, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences*, 146, 530-534 ; repris dans Langevin [1950], p. 301-303.

Langevin, Paul [1909a]. E. Mascart, *Annuaire du Collège de France*, 1909, 25 p.

Langevin, Paul [1909b]. L'œuvre de E. Mascart, *La Revue du mois*, 1909, 385-406.

Langevin, Paul [1911a]. L'évolution de l'espace et du temps, Conférence au Congrès de philosophie de Bologne, *Scientia*, 1911, in Langevin [1923], p. 265-300.

Langevin, Paul [1911b]. Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne, Communication du 19 octobre 1911, *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, 12, 1911-1912, 1-46 ; également in Langevin [1923], p. 301-344.

Langevin, Paul [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 in Langevin [1923], p. 70-170.

Langevin, Paul [1912b]. La théorie cinétique du magnétisme et les magnétons, Rapport présenté à la Conférence Solvay, Bruxelles, 30 oct.-3 nov. 1911, in Langevin et de Broglie [1912], p. 393-404 ; repris dans Langevin [1923], p. 171-188.

Langevin, Paul [1913a]. L'inertie de l'énergie et ses conséquences, *Journal de Physique*, 3, 1913, 553- ; repris dans Langevin [1923], p. 345-404 ; et dans Langevin [1950], p. 397-426.

Langevin, Paul [1913b]. La physique du discontinu, Conférence faite à la Société française de Physique le 27 novembre 1913 ; in Langevin [1923], p. 189-264.

Langevin, Paul [1913c]. L'œuvre d'Henri Poincaré. Le physicien, in Brunschvicg, Léon ; Hadamard, Jacques ; Lebeuf, A. et Langevin, Paul, *L'Œuvre de Henri Poincaré*, Supplément à la *Revue de métaphysique et de morale* 21, 1913, n° 5 (septembre), 584-718.

Langevin, Paul [1919]. *Le principe de relativité* (conférence à la Société des électriciens, décembre 1919), Chiron, Paris, 1922. Repris in Langevin [1950], p. 436-466.

Langevin, Paul [1920]. Les aspects successifs du principe de relativité, *Bulletin de la Société française de physique*, 1920, 138, 1920, 5-6. Repris dans Langevin [1923], p. 406-423, et dans Langevin [1950], p. 427-435.

Langevin, Paul [1922]. L'aspect général de la théorie de la relativité, *Bulletin scientifique des étudiants de Paris*, avril-mai 1922, 2-22. (Conférence du 30 mars 1922 à l'Association générale des étudiants, en présence d'Einstein.)

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

Langevin, Paul [1930]. L'orientation actuelle de la physique, in Brunschvicg, Léon et al., *L'Orientation actuelle dans les sciences*, Alcan, Paris, 1930.

Langevin, Paul [1931a]. L'oeuvre d'Einstein et l'astronomie, *L'Astronomie*, 45^e année, 1931, 277-301.

Langevin, Paul [1931b]. Déduction simplifiée du facteur de Thomas, in Arnold Sommerfeld, Vereinfachte Ableitung des Thomas Faktor, *Convegno di fisica nucleare*, Roma, 1931, p. 137.

Langevin, Paul (dir.) [1932a]. *La relativité. Série d'exposés et de discussions*. Fasc. 40 à 45 des *Actualités scientifiques et industrielles*, Hermann, Paris, 1932.

Langevin, Paul [1932b]. *La relativité. Conclusion générale*, in Langevin [1932a], fasc. 45.

Langevin, Paul [1950]. *Oeuvres scientifiques*, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1950.

Langevin, Paul [1964]. *La pensée et l'action*, Editions Sociales, Paris, 1964.

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

Mehra, Jagdish [1975]. *The Solvay Conferences on Physics*, Reidel, Dordrecht, 1975.

Meyerson, Emile [1931]. *Du cheminement de la pensée*, 3 vols., Alcan, Paris, 1931.

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

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.

Minkowski, Hermann [1908]. 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. (Conversations avec Einstein en 1919 et 1920.)

Nernst, Walter [1912]. Applications de la théorie des quanta à divers problèmes physico-chimiques, in de Broglie et Langevin [1912], p. 254-290. Original

allemand : Anwendung der Quantentheorie auf eine Reihe physikalisch-chemischer Probleme, *in* Eucken [1912], p. 208-233.

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

Paty, Michel [1985]. Invention et réception d'une nouvelle théorie et tradition scientifique: le cas de la relativité restreinte et des savants français Poincaré et Langevin, *Revista da Sociedade Brasileira de Historia da Ciencia*, n° 2, julho-dezembro 1985, 6-20.

Paty, Michel [1987]. The scientific reception of Relativity in France, *in* Glick, Thomas (ed.), *The Comparative reception of relativity*, Reidel, Dordrecht, 1987, p. 113-167.

Paty, Michel [1988]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.

Paty, Michel [1992]. Physical Geometry and Special Relativity: Einstein and Poincaré *in* Boi, Luciano; Flament, Dominique et Salanski, Jean-Michel (eds.), *1830-1930 : A century of geometry. Epistemology, history and mathematics*, Springer-Verlag, Berlin, 1992, p. 126-149.

Paty, Michel [1993]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

Paty, Michel [1995]. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics, *Foundations of physics* 25, 1995, n°1 (january), 183-204.

Paty, Michel [1996a]. Poincaré et le principe de relativité, *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 1984*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.

Paty, Michel [1996b]. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470. R

Paty, Michel [1997a]. *Albert Einstein, ou la création scientifique du monde*, Collection Figures du savoir, Belles Lettres, Paris, 1997, 156 p. D

Paty, Michel [1999a]. La place des principes dans la physique mathématique au sens de Poincaré, *in* Sebestik, Jan et Soulez, Antonia (éds.), *Actes du Colloque France-Autriche Paris, mai 1995, Interférences et transformations dans la philosophie française et autrichienne (Mach, Poincaré, Duhem, Boltzmann)*, *Fundamenta philosophiae* (Nancy/éd. Kimé, Paris) 3 (2), 1998-1999, 61-74. R

Paty, Michel [1999b]. Paul Langevin (1872-1946), la relativité et les quanta, *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 119, mai 1999, 15-20. D, R

Paty, Michel [1999c]. Les trois stades du principe de relativité, *Revue des questions scientifiques*, 170 (n°2), 1999 (*Les relativités. Première partie*), 103-150. R

Paty, Michel [1999d]. La création scientifique selon Poincaré et Einstein, *in* Serfati, Michel (éd.), *La recherche de la vérité*, Coll. L'écriture des Mathématiques, ACL-éditions du Kangourou, Paris, 1999, p. 241-280. R

Paty, Michel [1999e]. La réception de la Relativité au Brésil et l'influence des traditions scientifiques européennes, *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, . Trad en portug (Brésil) par Ana Maria Alves : A recepção da Relatividade no Brasil e a influência das tradições científicas europeias, *in*

Hamburger, Amelia Imperio; Dantes, Maria Amelia; Paty, Michel et Petitjean, Patrick (eds.), *A ciência nas relações Brasil-França.(1850-1950)*, Edusp, São Paulo, 1997, p. 143-181.

Paty, Michel [2000a]. Einstein et la pensée de la matière, in Monnoyeur, Françoise (éd.), *La matière des physiciens et des chimistes*, Le Livre de poche, Hachette, Paris, 2000, p. 193-222.

Paty, Michel [2000b]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de Philosophie*, n°212, 2-2000, 17-60.

Paty, Michel [à paraître, a]. *Einstein, les quanta et le réel. Critique et construction théorique*.

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

Paty, Michel [à paraître, c]. Les analogies mathématiques au sens de Poincaré et leur fonction en physique, in Durand-Richard, Marie-José (éd.), *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique*, éditions du CNRS, Paris, à paraître.

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 (avec un Supplément, par Pauli).

Pauli, Wolfgang [1964]. *Collected Scientific Papers*, ed. by R. Kronig and V. F. Weisskopf, 2 vols., New-York, Interscience/Wiley and Sons, 1964.

Perrin, Jean [1908]. L'agitation moléculaire et le mouvement brownien, *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* 146, 1908, 967- ; repris dans Perrin [1950], p. 168-170.

Perrin, Jean [1909]. Mouvement brownien et réalité moléculaire, *Annales de Chimie et Physique*, 1908, 8è série, n°18, 1909, 1-114 ; repris dans Perrin [1950], p. 171-239.

Perrin, Jean [1913]. *Les atomes*, nlle éd. présentée par Francis Perrin, Gallimard, Paris, 1970.

Perrin, Jean [1950]. *Oeuvres scientifiques*, Editions du CNRS, Paris, 1950.

Pestre, Dominique [1984]. *Physique et physiciens en France, 1918-1940*, éd. Archives Contemporaines, Paris, 1984.

Planck, Max [1906]. Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik, *Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen*, 8, 1906, 136-141.

Planck, Max [1907]. Zur Dynamik bewegter Systeme, *Königlich Preussisch Akademie des Wissenschaften in Berlin. Sitzungberichte*, 13, 1907, 542-570. Egalement, *Annalen der Physik*, 26, 1908, 1-34. dans *Annalen der Physik* 26, 1908, 1-34.

Poincaré, Henri [1900]. La théorie de Lorentz et le principe de réaction, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 2 è série, 5, 1900, 252-278. Repris dans Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 464-488.

Poincaré, Henri [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902 ; 1968.

Poincaré, Henri [1904]. L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique (Conférence au Congrès international des arts et des sciences, Saint-Louis, Missouri, 24 septembre 1904), *La Revue des idées*, novembre 1904, 801-818. Egalement, *Bulletin des sciences mathématiques* 28, 1904 (décembre), 302-324

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].

Poincaré, Henri [1905a]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905; 1970.

Poincaré, Henri [1905b]. Sur la dynamique de l'électron, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* 140, 1905 (séance du 5 juin), p. 1504-15. Egalement in Poincaré 1924, p. 79-81. Egalement in Poincaré [1950-1965], vol. 9, p. 489-493.

Poincaré, Henri [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 [1950-1965], vol. 9, p. 494-550.

Poincaré, Henri [1908a]. *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908.

Poincaré, Henri [1909]. 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.

Poincaré, Henri [1911]. 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.

Poincaré, Henri [1912a]. L'hypothèse des quanta, *Revue scientifique, revue rose*, février 1912, 225-232. Egalement in Poincaré [1913], éd. 1963, p. 110-127.

Poincaré, Henri [1912b]. Sur la théorie des quanta, *Journal de physique théorique et appliquée*, 5ème série, 2, 1912, 5-34. Repris dans Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 626-668.

Poincaré, Henri [1912c]. L'espace et le temps, *Scientia*, 12ème 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.

Poincaré, Henri [1913]. *Dernières pensées*, Flammarion, Paris, 1913; réed. 1963.

Poincaré, Henri [1924]. *La mécanique nouvelle. Conférence, mémoire et note sur la théorie de la relativité*, Introduction de M. Edouard Guillaume, Gauthier-Villars, Paris, 1924.

Poincaré, Henri [1916-1965]. *Oeuvres*, publiées sous les auspices de l'Académie des sciences, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1916-1965.

Poincaré, Henri [1991]. *L'analyse et la recherche*, choix de textes et introduction de Girolamo Ramunni, Hermann, Paris, 1991.

Schilpp, Paul-Arthur [1949]. *Albert Einstein: philosopher-scientist*, The Library of living philosophers, Open Court, Lassalle (Ill.), 1949. Ré-ed. 1970. Trad. en allemand, *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1955. [L'édition en allemand contient les textes originaux de Einstein [1949c] et de Pauli [1949].

Simon Rodrigues, Samuel [1995]. *L'identique et le divers dans la philosophie des sciences d'Emile Meyerson*, Thèse de doctorat en Epistémologie et histoire des sciences, Université Denis Diderot- Paris 7, 1er mars 1995.

Walter, Scott [1996]. *Hermann Minkowski et la mathématisation de la théorie de la relativité, 1905-1915*, Thèse de doctorat en Epistémologie et Histoire des Sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, 1996.

Walter, Scott [1999]. Minkowski, mathematicians and the mathematical theory of relativity, in Goenner, Hubert ; Jürgen Renn, Jim Ritter, Tilman Sauer (eds.), *The Expanding Worlds of General Relativity*, Einstein's Studies, vol. 7, Birkhauser, Boston-Basel-Berlin, 1999, p. 45-86.