

Invention et Réception d'Une Nouvelle Théorie et Tradition Scientifique: Le Cas de la Relativité Restreinte et des Savants Français Poincaré et Langevin*

Par Michel Paty
Equipe REHSEIS, Centre National de la Recherche scientifique, Paris.

RÉSUMÉ: Bien que le milieu scientifique français, par ses structures d'organisation, ses mentalités et ses présupposés épistémologiques dominants, fût peu préparé à recevoir les nouvelles conceptions sur la relativité restreinte, deux exceptions éminentes se sont avérées d'une importance considérable pour l'invention et le développement de la théorie de la relativité: les travaux de Henri Poincaré et de Paul Langevin. On en présente une analyse comparée, mise en regard du travail d'Einstein en 1905.

1 - Introduction: une réception inégale.

Le moins qu'on puisse dire de la réception de la relativité en France est qu'elle fut "inégaie". Considérées par rapport au milieu scientifique dans son ensemble, les conceptions de la relativité furent très lentes à pénétrer et rencontrèrent en premier lieu l'indifférence ou l'hostilité. La première, l'indifférence, est lisible dans l'enseignement, dans le contenu des programmes universitaires et dans celui des manuels, silencieux, à de très rares et tardives exceptions près sur les théories de la relativité (et ceci, pratiquement, jusque aux années cinquante). La deuxième, l'hostilité, se manifesta dans des prises de position d'universitaires importants jusque vers le milieu des années vingt. Un autre courant significatif, dont des mathématiciens aussi distingués qu'Emile Picard ou Paul Painlevé furent les représentants, s'affirma longtemps sceptique ou réticent avant de s'avouer, tardivement, convaincu.

Pourtant, l'attitude du milieu scientifique français ne peut être réduite à cette réponse essentiellement négative bien qu'elle fût majoritaire et qu'il soit en tout état de cause important de la comprendre, car elle est révélatrice d'un état d'esprit tributaire d'une tradi-

tion quelque peu figée et hostile aux renouvellements. Bien que d'une façon relativement marginale, les idées relativistes se sont en effet imposées très tôt à un courant scientifique qui, pour être minoritaire, n'en fut pas moins d'une importance considérable tant par ses contributions propres que par son influence dans la communauté scientifique sur le long terme, qui devait préparer l'acceptation au moins tacite du milieu dans son ensemble aux nouvelles théories, et surtout qui détermina des directions de recherche qui se sont avérées importantes et fécondes. Mieux, des éléments fondamentaux de la théorie de la relativité ont été trouvés indépendamment d'Einstein, au moment même ou celui-ci élaborait sa théorie de la relativité restreinte, par Henri Poincaré et par Paul Langevin. Il est intéressant de remarquer que le premier refusa la relativité au sens d'Einstein bien que ce soit sous sa plume que l'on trouve employé pour la première fois (en 1904) le terme "principe de relativité" au sens de la relativité restreinte. Par ailleurs, son refus de la nouvelle théorie ne saurait être assimilé à une "non-réception" de la relativité dont il fut l'un des pionniers. L'étude de sa position apparemment contradictoire sera particulièrement stimulante pour saisir dans leur complexité les conditions épistémologiques de la "réception" de la relativité. Le second - Langevin - accepta au contraire pleinement la relativité dès qu'il en eût connaissance, et fut ensuite à même de préciser certaines implications importantes et inaperçues de la théorie; c'est, pour l'essentiel, par son influence que les idées de la relativité réussirent peu à peu à s'affirmer en France, par le canal d'une élite de scientifiques formés ou informés par lui. Ici encore, l'examen du programme de travail propre à Langevin - proche par bien de ses caractères de celui de Poincaré - permet de comprendre certains traits essentiels des nouvelles conceptions face à leur réception.

Les débats scientifiques au moment fort de ce que l'on peut appeler la "bataille de la relativité", au début des années vingt, seront éclairés par les éléments que nous aurons acquis de l'étude de la réception de la relativité chez ces pionniers. Au soubassement de ces débats et des thèmes abordés se trouvent un certain type de pratique scientifique, un ensemble

* Ce texte est celui de l'original en français d'une conférence prononcée en portugais à la 37^e Reuniao anual da SBPC (Sociedade brasileira para o progresso da ciência), Belo Horizonte, 10-17 de julho de 1985, le 16 juillet 1985, sous le titre (modifié pour la publication): "Recepção de uma teoria e tradição científica: o caso da relatividade (Poincaré, Langevin e os cientistas franceses)".

de conceptions épistémologiques souvent implicites, qui, par-delà les programmes propres aux uns et aux autres, s'enracinent dans un certain sol intellectuel, culturel, institutionnel, que ce ne sera pas notre propos d'analyser ici en détail, mais dont nous ferons cependant une rapide évocation en commençant.

2 - Le contexte scientifique, institutionnel et épistémologique

Bien que la manière dont la théorie de la relativité et les conceptions relativistes ont été reçues par les scientifiques français diffère de façon notable d'un cas à un autre, et notamment chez les quelques savants éminents qui ont contribué à leur développement, la réceptivité des scientifiques est tributaire du contexte, dans la diversité de ses dimensions, qui caractérise leur milieu. C'est, tout d'abord, une certaine conception de la science et de la physique qui est en jeu, telle qu'elle se marque dans l'enseignement (la physique des cours et des manuels), et dans la pratique de la recherche, théorique ou de laboratoire. C'est également un certain type d'organisation institutionnelle, liée aux conceptions précédentes. C'est ensuite, au soubassement des conceptions et des pratiques, un ensemble de pré-supposés épistémologiques qui, bien que relativement diversifiés, dessinent des orientations générales constituant une sorte d'ossature commune que l'on peut assez aisément caractériser. Ces aspects, pris ensemble, et reliés à d'autres traits culturels du milieu scientifique et de son insertion sociale, constituent ce que des auteurs ont pu appeler un "socle archéologique", par lequel se manifeste une permanence profonde, une stabilité morphologique du milieu considéré¹. Dans le cas qui nous occupe, cet ensemble de caractères représente un terrain peu favorable à l'adoption des conceptions nouvelles.

Du point de vue de l'organisation de la recherche, on a pu caractériser le milieu de la physique en France, dans les premières décennies du vingtième siècle, comme un monde clos, peu ouvert aux échanges, dans lequel prédomine l'influence de structures d'enseignement figées, dominées par le modèle des grandes écoles avec son système de castes, de filières et de groupes d'influence déterminant une orthodoxie conservatrice, d'autant plus orientée vers le passé que celui-ci fut prestigieux. L'individualisme et la gérontocratie qui prévalent alors sont autant d'obstacles au renouvellement des idées.

Les grandes avenues de la recherche en physique sont celles de la physique expérimentale, dans les directions traditionnelles de la mécanique et de l'optique; les travaux théoriques relèvent essentiellement de la physique mathématique et sont l'oeuvre de mathématiciens. Il n'existe pratiquement pas, au début du siècle - et jusqu'aux années trente - de physique théorique à proprement parler: Duhem, en chimie physique, Langevin, en physique, sont l'exception. Il est significatif que ce ne soit que plus tard que l'on ait pu faire une différence entre la physique théorique et la physique mathématique², et il est vrai que le partage n'est pas toujours aisé à faire, comme nous le verrons à propos de Poincaré, dont les travaux en physique ne

sont pas réductibles à ceux d'un pur mathématicien. Mis à part ce cas, précisément, de Poincaré, plus complexe et qui demande une analyse spécifique, la grande tradition française de physique mathématique présente un obstacle par rapport à la relativité, par la coupure qu'elle détermine vis-à-vis de la physique proprement dite, qu'elle envisage d'une façon surtout formelle. La séparation qui existe de fait dans la pratique de la recherche, entre une physique mathématique et une physique conçue comme expérimentale interdit tout travail véritablement théorique comme réorganisation non seulement formelle conceptuelle mais d'un ensemble de connaissances. Or la relativité se présente précisément comme une telle réorganisation *théorique* de la *physique*. Dans un terrain peu préparé à cet égard à la recevoir, le travail d'un Langevin nous montre au contraire de façon éclairante comment la théorie physique est spécifiquement mise en oeuvre, entre la formulation mathématisée et l'expérimentation. Ce travail apporte ce qui manquait aux expérimentateurs pour s'intéresser au point de vue de la théorie nouvelle, et ce qui manquait aux mathématiciens pour voir comment c'est la *physique* qui est concernée et qu'il s'agit de tout autre chose que d'une sorte de réarrangement purement formel.

L'esprit qui prédomine en physique - accent mis sur l'aspect expérimental au détriment de la théorie et défiance à l'égard de cette dernière³ - contribue à expliquer le retard à la réception aussi bien de l'électromagnétisme de Maxwell⁴ que de la mécanique statistique, comme à celle de la relativité et de la théorie des quanta. Mais cette défiance est générale et ne se marque pas seulement à propos de théories "révolutionnaires": un Duhem, un Le Chatelier, qui s'opposent à ces dernières, ont dû lutter pour faire admettre la prise en considération, dans leur domaine, de l'organisation d'un savoir en un corps rationnel de propositions théoriques. Ce trait caractéristique des conceptions de la physique se perpétuera longtemps par le canal de l'enseignement⁵.

Quant au point de vue du cadre général des conceptions, la mécanique newtonienne est toute puissante et détermine une orthodoxie sans faille, bien illustrée dans un enseignement présentant la physique comme un corps de doctrine rigide d'un bloc, d'ou tous les éventuels points faibles sont éliminés ou masqués. La science y est présentée comme un ensemble achevé bardé de certitude, organisé autour des catégories newtoniennes et justifié par un positivisme qui prend, soit les couleurs du mécanisme, soit, de façon plus minoritaire, celles de l'énergétisme⁶. Ce n'est pas sans raisons que Langevin décela dans les nouvelles conceptions de la relativité la déroute d'un esprit positiviste (au sens comtien) qui organisait hiérarchiquement le savoir autour de catégories absolues et normatives⁷.

Il faudrait en vérité détailler davantage tous ces éléments qui expliquent comment, pour le milieu scientifique français, la théorie de la relativité, aussi bien restreinte que générale se présente comme un corps étranger. Mais les caractéristiques globales d'un contexte ne suffisent pas pour une détermination stricte des conditions et des circonstances de la réception ou de la non-réception. Au surplus, les program-

mes de recherche propres aux uns et aux autres et leurs conceptions épistémologiques rendent les explications précises différentes dans la plupart des cas (par exemple, la position hostile d'un Duhem présente des originalités que le contexte ne suffit pas à rendre et qui sont dûes en particulier à sa conception de la théorie physique qui à la fois valorise l'importance de la théorie et en restreint la portée par son conventionalisme et la manière dont il "minimise" le rôle des mathématiques, qui n'ont pas d'effet structurant⁸). Rien ne saurait donc remplacer l'analyse détaillée des conceptions telles qu'elles se marquent dans les travaux relatifs au domaine qui nous occupe, dans les attitudes en face des nouvelles idées et dans les thèmes des débats que celles-ci suscitent au sein de la communauté scientifique.

3 – Comment Henri Poincaré s'approcha de très près de la théorie de la relativité et la refusa.

3.1 – On a beaucoup écrit sur les rapports de Poincaré à la théorie de la relativité et sur son silence quant aux conceptions d'Einstein. Si l'on s'en tenait strictement ici à considérer la réception de la relativité au sens d'Einstein, il y aurait à première vue très peu de choses à dire du rôle de Poincaré, qui n'a jamais mentionné Einstein à cet égard, du moins dans ses articles publiés et dans ses écrits connus. Poincaré appartient cependant de toute évidence à notre sujet, puisqu'il fut l'un des initiateurs et même l'un des pionniers, en France et dans la communauté internationale, des idées de la relativité, même si ce fut dans un sens différent de celui d'Einstein. Par ailleurs, bien que son propre programme en la matière ait été par la suite peu suivi et n'ait donné lieu à aucune école, il ne fut pas sans exercer de fortes influences. On sait comment les résultats analytiques auxquels Poincaré était parvenu en 1905 sur la base de la théorie de l'électron de Lorentz (énoncé du principe de relativité), groupe de Lorentz et de Poincaré, notation de l'espace – temps à quatre dimensions que reprendra Minkowski en 1908) seront incorporés au formalisme ultérieur de la théorie de la relativité. Mais l'enseignement et les écrits de Poincaré ont eu également une influence considérable. A cette "mécanique nouvelle" qu'il annonçait en soulignant, avec une remarquable perspicacité, certains de ses traits fondamentaux, et bien qu'elle se soit développée en dehors du chemin qu'il avait balisé, bien des esprits furent préparés grâce à lui, même si ce fut parfois en étant de prime abord prévenus contre elle. Nous verrons comment Paul Langevin, qui avait suivi ses cours et qui l'accompagna au Congrès de Saint Louis de 1904⁹, reprit au début le programme qui était celui de Lorentz et de Poincaré et le transforma dans un sens conforme à celui d'Einstein; nous décelerons, plus tard, dans les débats des années vingt, une persistance de l'influence de Poincaré chez les mathématiciens, qui sans doute à la fois retarda, puis ensuite facilita une pleine adhésion aux conceptions relativistes de l'espace, du temps, et de la théorie physique. Nous ne ferons ici qu'évoquer brièvement les éléments directeurs des contributions et des conceptions de Poincaré par rapport à la théorie

de l'électrodynamique et à la relativité en soulignant leurs conséquences et leurs différences avec celles d'Einstein et en tentant d'éclairer ce qui lui fit refuser le point de vue d'Einstein.

3.2 – Le programme théorique de Poincaré dans le domaine de la physique qui nous occupe était orienté vers la recherche d'une théorie générale, basée sur la théorie électromagnétique des électrons, de la matière et du rayonnement. Or ce programme était celui-là même que poursuivait Lorentz, autour d'une représentation de la matière en termes de particules électriques en mouvement dans l'éther immobile.

La théorie de Lorentz lui paraissait précisément être, parmi les théories en présence, celle qui répondait le mieux aux critères que devait satisfaire à ses yeux une théorie de l'électrodynamique des corps en mouvement: rendre compte de l'entraînement partiel de l'éther (c'est-à-dire de l'expérience de Fizeau), de l'équation de continuité de la charge électrique et de celle des lignes de force magnétique, être compatible avec le principe de l'action et de la réaction¹⁰. Poincaré remarquait par ailleurs qu'aucune expérience ne pouvait mettre en évidence le mouvement absolu de la matière pondérable par rapport à l'éther, et que ceci semblait vrai aux ordres supérieurs en v/c , comme en témoignait l'expérience de Michelson. C'était en quelque sorte le constat d'un principe de relativité (il le baptiserait ainsi quelques années plus tard, en 1904), que la théorie de Lorentz aurait à respecter également.

Par ailleurs dans ses analyses critiques des concepts et des principes de la mécanique classique influencées en partie par celles de la *Mécanique* de Mach, Poincaré insistait sur le caractère relatif de l'espace et du temps, ainsi que sur la possibilité de remettre en cause les principes de la mécanique classique, cette science étant une science expérimentale et n'impliquant aucun absolu a-priori¹¹. On trouve dans la *Science et l'hypothèse* ces énoncés: "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"¹². Cette dernière remarque était d'ailleurs étayée par l'analyse opératoire de la simultanéité proposée par lui dès 1898 et très voisine de celle qu'Einstein devait donner dans son mémoire de 1905¹³; reprenant cette analyse en 1904, Poincaré étudia le problème de la synchronisation d'horloges, animées un mouvement d'inertie par rapport à l'éther mais en repos relatif l'une par rapport à l'autre, par l'échange de signaux lumineux. Il admettait cependant qu'il y a un temps vrai, différent du temps local de Lorentz; mais leur différence étant petite et imperceptible, la distinction n'avait pas d'importance¹⁴. Poincaré admettait également le principe d'une remise en cause de l'espace euclidien: "notre géométrie euclidienne n'est elle-même qu'une sorte de convention de langage; nous pourrions énoncer les faits mécaniques en les rapportant à un espace non euclidien qui serait un repère moins commode, mais tout aussi légitime que notre espace ordinaire"¹⁵. Quant à l'éther, il considérait qu'il s'agissait au fond d'une hypothèse commode pour l'explication des phénomènes, mais cette "commodité" n'était pas si facultative: il la voyait du

même ordre que celle qui consiste à postuler l'existence des objets matériels; pas tout à fait cependant, et il établissait une différence entre les deux, l'existence des objets matériels ne devant jamais cesser d'être une hypothèse commode, "tandis qu'un jour viendra sans doute où l'éther sera rejeté comme inutile"¹⁶. Tous les concepts étaient à ses yeux criticables car leur origine et leur justification sont purement expérimentales; il devait néanmoins s'efforcer, dans ses recherches ultérieures, et notamment dans son article de 1905 sur "la dynamique de l'électron"¹⁷, de garder le temps absolu et la géométrie euclidienne (c'est probablement dans l'idée de préserver le temps absolu qu'il proposa, au lieu de la contraction physique de Lorentz, l'hypothèse d'un éther déformable¹⁸). Ce maintien souhaité fait sans doute la différence la plus nette entre les théories de Poincaré et d'Einstein quant aux concepts de base.

3.3 – Le programme que se fixait Poincaré était dès lors tracé: compléter la théorie de Lorentz tout en la simplifiant, voire en la corrigeant sur des points jugés mineurs, lui octroyer une plus grande rigueur, et lui donner un degré de généralité tel qu'elle puisse rendre compte de l'ensemble des propriétés de la matière. C'est à un tel perfectionnement qu'il s'astreint dès lors, et il ne prétendit jamais avoir fait davantage (lorsqu'il parla, en 1904, du *principe de relativité*, c'est à Lorentz qu'il en attribua la paternité). Il alla en fait au-delà de la théorie de Lorentz et s'approcha d'aussi près qu'il était possible en suivant son programme (que l'on peu à posteriori qualifier de réformiste et non révolutionnaire) des conséquences requises par ce qu'il appellerait un peu plus tard la "mécanique nouvelle". En particulier, son introduction de la notion de quantité de mouvement de l'onde électromagnétique fut décisive pour le développement de l'idée d'inertie électromagnétique et de la variation de la masse avec la vitesse. Poincaré devait en retenir l'idée que les particules doivent toute leur inertie à leur nature électromagnétique. Ayant annoncé, au Congrès de Saint-Louis, la nécessité d'une théorie unifiée de phénomènes électromagnétiques qui étaient considérés séparément selon la diversité de leurs manifestations¹⁹, c'est à en dégager les caractères essentiels qu'il consacra son travail de synthèse à la fois théorique et formelle de 1905 publié aux *Rendiconti* de Palerme en 1906²⁰.

La portée de ce travail est considérable. Reprenant la théorie de l'électron de Lorentz de 1904 (améliorée par rapport à celle de 1895), il en propose des modifications qui représentent en fait un stade très élaboré de formalisation théorique. Il donne des formules de transformation de systèmes de coordonnées en mouvement inertiel relatif une forme entièrement symétrique, systématisant ainsi le principe de relativité. Il établit également la formule de composition relativiste des vitesses²¹, et démontre que les équations de Lorentz forment un goupe. Sa familiarité avec la théorie des groupes lui fait rechercher les invariants des transformations qui permettent d'énoncer les lois de la physique indépendamment du système de référence, et se poser le problème de la forme de ces lois pour qu'elles soient conformes au principe de relativité (ce qu'on appelle covariance). L'invariant le plus simple est la forme quadratique $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$,

écrite ainsi pour la première fois, en adoptant la notation *ict* pour la coordonnée de temps. D'autres invariants sont la pression (dont celle de Poincaré), et l'intégrale d'action qui permet d'exprimer un principe de moindre action général, susceptible de représenter les lois de la dynamique. Enfin, il s'efforce d'étendre aux forces de gravitation le principe de relativité, montrant qu'elles doivent se propager à vitesse finie (celle de la lumière), de proche en proche, et qu'il faut en conséquence modifier la loi de Newton dans le cas des grandes vitesses, "précisément de la même manière que les lois de l'Electrostatique pour l'électricité en mouvement²²"; il formule à ce propos un principe de correspondance par lequel la théorie de Newton est retrouvée à l'approximation de la vitesse de propagation infinie. Il suggère que "c'est dans le mouvement de Mercure que l'effet sera le plus sensible, parce que cette planète est celle qui possède la plus grande vitesse", et calcule l'anomalie qui en résulte pour le périhélie (elle est partielle, de l'ordre de 6 secondes d'arc au lieu des 38 secondes observées mais cette correction va, note-t-il, dans le bon sens).

3.4 – On peut donc dire que Poincaré a poussé la théorie relativiste de l'électron de Lorentz dans ses implications les plus profondes. Peut-on pour autant parler d'une *théorie de la relativité* et dire qu'il a co-découvert cette dernière avec Einstein, voire en devançant celui-ci ou même en allant, à cette époque (aux environs de 1905), plus loin que lui?²³ La question ici n'est pas, bien entendu, celle des mérites respectifs des oeuvres de Poincaré et d'Einstein, qui sont dans les deux cas immenses, même à s'en tenir au chapitre qui concerne l'électrodynamique et la relativité restreinte, mais de savoir quels rapports existent entre les programmes qui sous-tendent ces deux théories. Vus après coup, de tels rapports existent, assurément. Il est cependant symptomatique que Poincaré et Einstein aient été silencieux quant à leurs travaux réciproques.

On sait qu'Einstein qui, selon les commentateurs, réfléchissait beaucoup et lisait assez peu (surtout relativement isolé de la communauté scientifique et de ses publications, comme il l'était à Berne pendant la gestation de la relativité restreinte), s'il avait eu connaissance du travail de Lorentz de 1895, ignorait celui de 1904 (d'ailleurs peu diffusé)²⁴ qui contenait les formules de transformation; et s'il avait lu *La Science et l'Hypothèse* de Poincaré, qui contenait certes des considérations critiques sur l'espace et le temps et les concepts classiques, il ne connaissait vraisemblablement pas son analyse de la simultanéité, ni ses travaux de 1904 (et évidemment pas celui des *Rendiconti* de 1906 écrit en même temps que le sien²⁵).

Quant à Poincaré on a pu s'étonner de son silence sur les travaux d'Einstein en matière de relativité: jamais il n'a cité son nom à ce propos, et ce n'est certainement pas pour de mesquines raisons de priorité. Pourtant, la théorie d'Einstein répondait aux critères d'esthétique et de simplicité qu'il ne trouvait pas exactement réunis dans la théorie de Lorentz, dont il avait réussi à formuler de façon systématique les propriétés générales d'invariance. C'est le programme d'Einstein en matière de théorie physique, et le caracté-

tère de cette théorie physique qu'était la relativité restreinte, qui ne pouvaient rencontrer son adhésion, peut-être parce que cette théorie rompait trop radicalement avec l'ancienne, peut-être aussi parce qu'elle ne répondait pas à l'ensemble du programme qu'il assignait à une théorie physique de la matière: si Einstein se proposait également dans ses recherches un programme d'ensemble sur les propriétés de la matière, sa méthode était autre, et il abordait séparément les problèmes en fonction de leur spécificité. D'autres que Poincaré se sont d'ailleurs mépris sur sa méthode dans ses premières recherches, le croyant intéressé avant tout par l'aspect immédiat et pratique des questions qu'il abordait, mené en premier par une préoccupation heuristique, sinon empirique, et guidé par une imagination quelque peu incontrôlée. On conçoit volontiers que la théorie de la relativité d'Einstein abordait, aux yeux de Poincaré, de manière plutôt cavalière un ensemble très complexe de problèmes, prétendant les ramener à deux principes (dont il pouvait, certes, admettre lui-même la très probable validité), et sans se préoccuper des autres aspects des propriétés de la matière, considérés indépendamment par ailleurs: tels ces quanta d'énergie qui rencontraient également son scepticisme²⁶. Faisant, dans une lettre de recommandation adressée à Pierre Weiss en novembre 1911, un éloge de la valeur et de l'originalité scientifique d'Einstein, Poincaré mentionnait la facilité avec laquelle ce dernier "s'adapte aux conceptions nouvelles et sait en tirer toutes les conséquences", sa capacité à envisager les diverses possibilités d'un problème de physique et à traduire celles-ci en "prévision de phénomènes nouveaux, susceptibles d'être un jour vérifiés par l'expérience" – Et il ajoutait: "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; 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 que l'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"²⁷. Quelques semaines auparavant, Einstein et Poincaré s'étaient rencontrés au premier Conseil Solvay où Einstein avait présenté ses travaux sur les chaleurs spécifiques. Poincaré fut impressionné²⁸, mais ne fut pas convaincu par les conceptions d'Einstein sur la relativité qui ne furent pas discutées en séance, mais qui étaient sous-jacentes à certains problèmes abordés, et qui furent l'objet de conversations en marge du Conseil. Einstein en a donné le témoignage suivant: "(vis-à-vis de la théorie de la relativité) Poincaré affichait tout simplement une attitude de refus, et faisait preuve, malgré toute sa perspicacité, de peu de compréhension pour la situation"²⁹.

3.5 – Les contributions de Poincaré à ce qui devait être la théorie de la relativité sont d'une importance décisive. On s'est interrogé sur le point de savoir pourquoi ce n'est pas lui, mais Einstein, nouveau venu dans le domaine de l'électrodynamique dont Poincaré était beaucoup mieux informé que lui quant aux tra-

voux récents, qui a pleinement développé les conceptions relativistes et la théorie de la relativité.

Ce qui nous retient ici, ce n'est tant d'obtenir une réponse définitive et complète quant aux raisons de Poincaré lui-même, que de déceler, dans la manière dont il concevait la relativité (lisible dans son programme de travail), manière qui est différente de celle qui devait plus tard être acceptée (celle d'Einstein), l'indice d'une sensibilité théorique et épistémologique déterminant certaines lignes importantes d'orientation dans le terrain intellectuel ou la relativité, dès lors élaborée, se propose à la réception.

Poincaré est allé aussi loin qu'il était possible dans l'idée de relativité tout en demeurant à l'intérieur d'un cadre de pensée plus traditionnel ou conservateur. Qu'il ait tenu à maintenir ce cadre, il en a témoigné lui-même: "les théories anciennes", écrivait-il par exemple dans *La Science et l'hypothèse*, "reposent sur un grand nombre de coïncidences numériques qui ne peuvent être attribuées au hasard; nous ne pouvons donc disjoindre ce qu'elles ont réuni; nous ne pouvons non plus briser les cadres, nous devons chercher à les plier"³⁰.

C'est précisément la permanence du cadre conceptuel de la mécanique qui fait la différence entre les significations physiques de sa théorie et de celle d'Einstein. Bien que les formules de transformation aboutissent à une même cinématique, chez Poincaré le temps absolu et l'éther sont préservés, par son explication (de nature dynamique), par la pression de l'éther sur l'électron, de la contraction dans le sens du mouvement. De sorte que, si l'on peut dire en un sens que les équations du mouvement de l'électron de Poincaré fournissent une cinématique (formules de transformations des coordonnées, règles d'addition des vitesses), c'est sur le fond d'une dynamique de l'éther, dont l'effet est de maintenir l'ancien cadre, c'est-à-dire le caractère fondamental de l'ancienne cinématique (qu'il ne s'agit dès lors que d'adapter). L'interprétation (au sens de la physique) des deux théories n'est pas équivalente, et la relativité au sens de Poincaré s'apparente bel et bien à une *dynamique*. Le programme de Poincaré orienté vers l'accès à une théorie générale (électromagnétique) de la matière atomique lui interdisait de dissocier l'aspect cinématique et l'aspect dynamique du mouvement des corps. Il revenait précisément au pont de vue propre à Einstein de permettre un accès immédiat à une cinématique des corps en mouvement indépendamment de toute considération de dynamique, que ce soit pour ces corps ou pour un éther munie de propriétés de cette nature. Cette insistance sur la cinématique – c'est-à-dire sur la structure de l'espace-temps – en faisant l'économie de toute autre considération ici superflue, revient à mettre en avant le cadre d'une nouvelle mécanique, et à renouveler Newton.

Dans une évocation de son travail de 1905 et de ses antécédents, Einstein a bien mis le doigt sur ce qui faisait en réalité 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"³¹.

Pour Poincaré, l'invariance de Lorentz est une condition générale dans la mesure où la théorie physique est en dernier ressort une théorie des propriétés électromagnétiques de la matière. C'est donc la nature même du programme de Poincaré qui est ici en cause, sous le rapport de la généralité du principe de relativité, et de son caractère fondateur quant à la théorie. Si Poincaré a choisi son programme d'une théorie totalement électromagnétique de la matière (et, indissociablement, relativiste), c'est parce qu'il se basait sur l'expérience, et que la théorie devait à ses yeux en émaner par induction sur la base, ou dans le cadre des connaissances bien acquises jusqu'ici. Certes, cette induction n'avait pas à ses yeux un caractère de contrainte absolue (en raison de son conventionalisme, qui s'associait à un empirisme): et c'est pourquoi il était possible de modifier la théorie initiale, et de préserver en même temps des éléments importants de la physique classique³². L'affirmation d'Einstein posant en principe fondateur, pour toute théorie physique, le principe de relativité, et le primat de la constance de la vitesse de la lumière, devait lui apparaître comme un coup de force arbitraire qui visait, ni plus ni moins, à remplacer le système de la mécanique newtonienne par un autre système tout aussi rigide (et ici, sa critique non formulée aurait vraisemblablement rejoint celle de Mach qui considérait la théorie de la relativité d'Einstein comme dogmatique).

4 - L'approche de Paul Langevin et son rôle dans la diffusion de la relativité

4.1 - Paul Langevin fut l'un des premiers physiciens dans le monde à comprendre toute la portée des travaux d'Einstein sur la relativité restreinte, puis sur la relativité générale dont il suivit pas à pas le développement³³. Il s'en fit très vite le divulgateur et le propagandiste dans le milieu scientifique mais également auprès des philosophes, ainsi que des étudiants et même du grand public. Son influence en France pour la connaissance des conceptions nouvelles fut considérable, puisque c'est essentiellement par son intermédiaire, et notamment par ses cours du Collège de France, suivis par une élite de mathématiciens et de physiciens, que toute une génération les apprit, détaillées, analysées, explicitées, et même développées dans des implications physiques encore inaperçues³⁴. L'importance de Langevin a été attestée tant par les physiciens français que par les savants les plus réputés au niveau international. Il fut, selon le témoignage de Louis de Broglie, "pendant de nombreuses années le grand maître de la Physique théorique en France"³⁵, et Einstein lui-même écrivait en 1940: "le professeur Langevin est sans aucun doute l'un des plus éminents savants contemporains. Parmi ses travaux originaux, on connaît universellement ses théories statistiques du magnétisme et des phénomènes d'ionisation dans l'atmosphère et du mouvement brownien. Il était encore un homme jeune quand il fut nommé Professeur au Collège de France. Ses cours dans cette célèbre institution ont exercé la plus grande influence sur le développement de la jeune génération des physiciens fran-

çais. Peu nombreux sont aujourd'hui les hommes ayant comme lui maitrise sur l'ensemble de la physique moderne"³⁶. Des 1911, lors du premier Conseil Solvay, Einstein et Langevin s'étaient liés d'une amitié personnelle profonde et durable, nourrie par un accord sur la plupart des problèmes importants, scientifiques, éthiques et politiques. Au moment de la mort de Langevin, Einstein écrit ceci, qui résume une partie du propos que nous voulons développer ici: "Dans sa pensée scientifique, Langevin était d'une clarté et d'une vivacité extraordinaire, jointes à un coup d'oeil d'une grande sûreté intuitive pour le point essentiel. Ces qualités-là faisaient que ses cours influencèrent d'une façon décisive plus d'une génération de physiciens théoriciens français (. . .). C'est aussi par des travaux originaux qu'il avait une influence décisive (. . .). Le fardeau des devoirs toujours entrepris de son plein gré gênait toutefois ses propres recherches; c'est pourquoi le fruit de ses travaux apparaissait plus dans les publications d'autres savants que dans les siennes. Il me paraît certain qu'il aurait développé la théorie spéciale de la relativité si cela n'avait pas été fait ailleurs; car il en avait clairement reconnu les points essentiels . . ."³⁷. Le témoignage d'Einstein est évidemment du plus haut intérêt, en raison notamment de la dernière remarque. Il est peu de physiciens dont Einstein aurait pu dire, comme de Langevin, qu'il était aussi proche de ses idées sur la relativité au moment même de leur élaboration. Travaillant, comme Lorentz, Poincaré et Einstein lui-même, sur l'électrodynamique, Langevin reconnut tout de suite l'originalité et la supériorité du point de vue d'Einstein. Cette adhésion immédiate à la théorie de la relativité au sens de ce dernier est d'autant plus remarquable qu'il suivait un programme plus proche de celui de Lorentz et Poincaré - et qu'il parvint, plus loin qu'eux, à une généralisation de l'inertie de l'inertie, exprimant la fameuse formule $m = E/c^2$, et qu'il avait été l'élève de Poincaré, dont il connaissait de très près les travaux sur le sujet, qu'il appréciait. Passons sur la profonde honnêteté intellectuelle et même l'abnégation qui lui firent délaissier l'originalité de sa propre approche pour adopter sans réserve la théorie d'Einstein et s'en faire le simple porte-parole. Par delà l'intérêt proprement historique de la découverte par Langevin d'éléments essentiels de cette théorie, qui confirment et précisent la remarque d'Einstein selon laquelle les idées de la relativité restreinte étaient, vers 1905, mures à plusieurs endroits, sa position originale 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. Nous verrons aussi combien cette position, théorique et très préoccupée en même temps de physique expérimentale, possédait sa fécondité propre en dégagant, grâce à un sens physique très "concret", diverses implications restées inaperçues mais d'une importance considérable.

4.2 - Langevin avait commencé ses travaux de recherches en 1895 avec Jean Perrin sur la décharge des corps électrisés par les rayons X et effectué, en 1897-1898, un séjour d'une année au laboratoire de

J.J. Thompson à Cambridge, au moment où ce dernier découvrit l'électron. Il poursuivit dans cette direction ses recherches sur gaz ionisés, puis sur la théorie du magnétisme, et se trouva ainsi amené à étudier sous tous ses aspects la théorie des électrons. C'est sur ce sujet qu'il fut appelé à présenter un exposé d'ensemble au Congrès de Saint-Louis, aux Etats-Unis, en septembre 1904, où Henri Poincaré et lui-même constituaient la délégation française. Cet exposé, "La physique des électrons", est une longue et remarquable synthèse des problèmes expérimentaux et théoriques de l'ensemble des phénomènes de l'électrodynamique³⁸. Très informé des travaux contemporains, dans lesquels s'inséraient ses propres contributions, Langevin en présentait les éléments essentiels en tentant 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 fait nouveau 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: la "physique des électrons" est appelée à étendre sa portée à la physique tout entière, et, par là, à "jeter une clarté sur les conceptions fondamentales de la Mécanique newtonienne elle-même"³⁹. Ce qui se trouve ainsi dessiné c'est le programme d'une physique nouvelle, centrée sur les notions d'électron et d'atome. La description que donne Langevin, dans son exposé de 1904, des propriétés de la matière atomique et électrique, envisagées du point de vue expérimental aussi bien que théorique, paraît devoir aboutir à une théorie atomique et électrique de la matière, fondée sur une double base: celle de l'éther électromagnétique, et celle de la structure granulaire de l'électricité. Il s'agit donc d'une perspective lorentzienne, mais avec, comme nous allons le voir, des différences qui lui permettront de dépasser le programme de Lorentz et de Poincaré. Avec Langevin, en effet, la synthèse entrevue des propriétés physiques de la matière est désormais située *en dehors* de la mécanique newtonienne, au profit de la prépondérance des notions électromagnétiques⁴⁰. Dans l'article sur la physique des électrons de 1904, la notion fondamentale d'*électrons* conçus comme des centres électrisés (dont l'existence est établie expérimentalement) "mobiles par rapport à un *éther* fixe défini par les équations de Hertz" est en effet, pour Langevin, ce autour de quoi s'organise la représentation des propriétés de la matière: de l'électron et de l'éther se déduisent et l'inertie et la dynamique⁴¹. En particulier, l'inertie de l'énergie électromagnétique garantit le principe d'inertie et celui de relativité (que Langevin n'appelle pas encore ainsi): leur formulation est dès lors acquise au-delà de la mécanique et indépendamment d'elle, puisqu'on n'a pas eu jusqu'ici à la faire intervenir. La transformation de Lorentz et la contraction dans le sens du mouvement sont, il est vrai, requises pour assurer l'indépendance par rapport aux mouvements de translation, mais Langevin n'en discute pas la nature, la définition respective des systèmes en mouvement relatif étant ramenée à un simple changement de variables qui conserve la forme des équations. Langevin n'éprouve aucune nécessité d'en

donner une représentation matérielle car cela reviendrait à postuler des propriétés mécaniques de l'éther, ce qu'il s'est proscrit au début de son travail et qu'il confirme dans la suite: il ne s'agit évidemment pas d'une démonstration de la non-mécanicité de l'éther, mais d'un programme sur ce dernier. C'est dans ce programme que réside l'innovation de Langevin par rapport à ceux de Lorentz et de Poincaré: le point de vue électromagnétique n'a pas besoin de se concilier celui de la mécanique, il a prééminence sur lui, et les notions de la mécanique n'apparaissent que comme des notions dérivées dans certaines conditions d'approximation. Même dans son travail de 1906, Poincaré n'est jamais allé aussi loin. L'électrodynamique montre en fait les limites de la mécanique et de ses notions (par la modification substantielle qu'elle opère de la forme de ses concepts, en particulier la variation de la masse inertielle avec la vitesse): "c'est bien plutôt l'éther qu'il faut considérer *comme fondamental*, et il est alors naturel de le définir initialement par les propriétés que nous lui connaissons, c'est-à-dire par les champs électrique et magnétique, considérés comme fondamentaux et qu'il est possible d'atteindre (...), sans admettre à aucun moment la connaissance des lois de la Dynamique, les notions de masse et de force sous leur forme ordinaire. Nous retrouverons ces dernières comme des notions dérivées et secondaires"⁴². Remarquons que l'éther (qui demeurera encore relativement longtemps dans le vocabulaire de Langevin, jusqu'en 1913) n'est plus défini que par les champs électrique et magnétique, sans autre propriété.

Avec Langevin la physique de l'éther est une physique où les concepts fondamentaux sont ceux de ces champs.

D'où le renversement de point de vue proposé: "considérer l'analogie signalée par Maxwell entre les équations de l'électromagnétisme et celles de la dynamique de Lagrange comme justifiant beaucoup plus la possibilité d'une représentation électromagnétique des principes et des notions de la Mécanique ordinaire, matérielle, que la possibilité inverse"⁴³. C'est ce qu'il propose, en formulant un analogue, pour les énergies électrique et magnétique, du principe de Hamilton, d'où l'on peut dériver les équations du mouvement, la dynamique des électrons⁴⁴. Telle est pour l'essentiel la "théorie électronique de la matière", susceptible de s'appliquer aux autres phénomènes connus (et Langevin développa en particulier à partir d'elle sa théorie du magnétisme). Ce n'est plus d'adaptation de la théorie ancienne et de maintien du cadre ancien de pensée qu'il s'agit désormais: "cette notion" (d'électron, lien entre l'éther et la matière) "a pris en peu d'années un développement immense, qui lui a fait briser les cadres de l'ancienne Physique et renverser l'ordre établi des notions et des lois pour aboutir à une organisation qu'on prévoit simple, harmonieuse et féconde"⁴⁵.

4.3 - En 1905, Langevin donna deux contributions qui précisaient ou développaient de façon significative des aspects abordés dans l'article de synthèse du congrès de Saint-Louis, concernant la relativité. Le premier, assez court, s'intitule précisément "Sur l'impossibilité physique de mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre". Langevin y démontre

que la récente théorie de l'électron déformable de Lorentz, avec son modèle de la contraction longitudinale⁴⁶, permet d'expliquer le résultat négatif de l'expérience de Trouton et Noble sur la torsion d'un condensateur plan par rapport à la direction du mouvement de la Terre⁴⁷.

Le second porte "sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique"⁴⁸. Son intérêt majeur est d'amorcer une systématisation de la relation entre l'inertie et l'énergie électromagnétique, que Langevin étendra peu après à toute forme d'énergie. Langevin s'y pose le problème de la nature de l'inertie pour la matière en général, le cas des électrons négatifs en étant un exemple particulier. "Il est tentant", écrit-il, "pour ne pas chercher deux explications différentes d'un même phénomène" (c'est-à-dire une explication électromagnétique dans le cas des électrons et une autre - mécanique? - dans le cas des autres particules matérielles), "d'étendre ce résultat à toute la matière en considérant l'inertie de celle-ci comme l'inertie électromagnétique totale des électrons positifs et négatifs qui la constituent"⁴⁹. C'est en recherchant une manière de caractériser l'énergie inertielle des électrons (ou, plus généralement, des particules matérielles) soit libres, soit soumis à accélération, à partir de la forme des champs électriques et magnétiques et de leur variation, que Langevin se propose d'élucider cette question, dont il sait par ailleurs qu'elle est reliée aux "limites de validité des lois de la mécanique"⁵⁰.

Il définit les notions de "sillage", d' "onde de vitesse" et d' "onde d'accélération" (reprises par Poincaré dans son article de 1906), qui lui permettent d'écrire l'énergie électromagnétique dont la forme obtenue indique que "les équations de la Mécanique doivent être modifiées de deux manières distinctes". La première est relative à la variation de la masse en fonction de la vitesse, qui enjoint "de croire à l'origine électromagnétique de l'inertie et à l'impossibilité de fonder une Mécanique satisfaisante sans prendre les notions électriques comme fondamentales". La deuxième porte sur la forme même des équations de la dynamique (que la seule variabilité de la masse continue de respecter), et Langevin montre la nécessité formelle de les modifier en considérant l'énergie de changement (due à l'action des forces extérieures), fournie par la mécanique et l'énergie rayonnée, petite par rapport à la première (donc négligeable en première approximation), mais que la mécanique ne fournit pas. De telles considérations, conclut Langevin, "semblent jeter quelque lumière sur le mécanisme intime des phénomènes d'inertie et de rayonnement"⁵¹. Elles tracent, de fait, la voie à une modification fondamentale des lois du mouvement des corps et de leur dynamique. Cette modification, Langevin ne l'a pas effectuée lui-même. Il en a encore éclairé quelques aspects, par une généralisation encore plus poussée de la forme de l'inertie, exposée dans son cours du Collège de France de l'année 1905-1906, mais non publiée, et sur laquelle nous avons le témoignage de son assistant d'alors, Edmond Bauer⁵². C'est dans le travail d'Einstein de 1905, alors porté à sa connaissance, que Langevin reconnut l'accomplissement du programme qu'il avait tracé et qu'il n'avait pas encore mené jusqu'au bout.

4.4 - Il demeurait, dans la synthèse de Langevin, un certain nombre de questions ouvertes. Si la suprématie des conceptions électromagnétiques sur celles de la mécanique lui semblait enjoinde de prendre désormais le point de vue de l'éther électromagnétique, il s'agissait d'une position programmatique: en particulier, elle admettait la contraction de Lorentz, sans l'étayer (comme le fit Einstein) d'une conception complète du cadre spatio-temporel et des relations de la cinématique correspondante. Mais ce qui, dans ce caractère ouvert (et, ici, inachevé), constituait une faiblesse (notamment en égard aux exigences d'une théorie relative à l'ensemble des propriétés de la matière), était en même temps une force par rapport à une pleine compréhension du nouveau point de vue. Langevin laissait dans l'ombre la question d'une théorie globale, au contraire de Poincaré, que menait la double préoccupation d'une cohérence de la théorie en regard de la totalité des phénomènes et celle du maintien du cadre conceptuel antérieur. Bien qu'il fût mené par le souci d'une "synthèse" qui lui paraissait devoir résulter inévitablement des nouvelles conceptions, il ne lui paraissait pas possible d'accomplir celle-ci en gardant le cadre de la mécanique, et en particulier en se donnant une représentation matérielle de l'éther. C'est dans "l'éther électromagnétique" que résidait l'essence du nouveau point de vue, c'est-à-dire dans les notions prises pour fondamentales de champ électrique et magnétique, capables de se propager et d'interagir avec la matière. Mais le cadre de ces conceptions n'était pas encore déterminé: il s'agissait d'un programme à accomplir. Une condition nécessaire de la réalisation de ce programme - et c'est là que réside l'originalité et la force de la position de Langevin - était de ne pas donner une représentation mécanique de l'éther. Non seulement il ne se sentait pas obligé de recourir à une telle représentation (ce qui eût suffi à laisser sa synthèse inachevée, donc ouverte), mais il en refusait l'éventualité (ce qui ouvrait précisément ses conceptions à la possibilité d'un autre achèvement de la synthèse), en raison de sa conception qui ne craignait pas d'opposer radicalement les notions de la mécanique et celles de l'électromagnétisme. Son attitude de théoricien 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. C'est pourquoi il alla, dans la direction qui devait prévaloir, un peu plus loin que Poincaré et un peu moins loin qu'Einstein. Il n'est dès lors pas étonnant que, sitôt qu'il fût en présence des travaux de ce dernier, il ait immédiatement compris que c'était là la perspective totalement satisfaisante dans la direction de laquelle il s'était lui-même orienté, jusqu'à parvenir à l'expression la plus frappante et à la forme si simple en définitive, qui résumait les conceptions nouvelles, celle de l'inertie de l'énergie. Mais le souci formel n'était pas absent de sa pensée, puisque c'est ce souci qui lui fit reconnaître dans le travail d'Einstein la synthèse entrevue, et que, par ailleurs, il se situa dès lors dans le cadre de l'expression formalisée de la théorie de la relativité pour en détailler les implications aussi bien au niveau conceptuel qu'à celui des phénomènes physiques.

4.5 – Langevin se fit dès lors le porte-parole du point de vue relativiste qui correspondait si parfaitement à ce qu'il avait lui-même annoncé. Son propre travail sur les problèmes d'électrodynamique, en même temps qu'il l'avait rendu réceptif à la portée des idées relativistes et lui avait fait adopter pleinement le nouveau point de vue (celui d'une dynamique du champ continu), le prédisposait à saisir les notions et la formulation de la relativité d'une manière originale, en fonction de ce qui constituait son propre "programme", non seulement physique mais épistémologique⁵³, désormais en possession de la théorie cherchée. Théoricien et expérimentateur en même temps. Langevin, qui était sensible à la perfection formelle de la théorie, n'oubliait pas pour autant ses intérêts "phénoménologiques", et sut apercevoir comme aucun autre certaines conséquences de la théorie de la relativité sur les propriétés les plus générales de la matière et du mouvement.

Ses considérations de 1913 sur les implications, quant à la structure élémentaire de la matière, de l'inertie de l'énergie, s'inscrivent en ligne directe dans la suite de ses propres recherches sur l'inertie, dont la perspective relativiste donnait une pleine généralisation⁵⁴. Sans introduire aucun modèle ou théorie supplémentaire relatif à la constitution de la matière, Langevin put, par la seule considération du caractère général de l'inertie de l'énergie, en inférer une propriété fondamentale de la matière, celle que l'on peut résumer par la notion d'énergie de liaison ou de défaut de masse, qui devait s'avérer ultérieurement si importante. De la forme de l'énergie prise par les particules d'une part, par le rayonnement de l'autre, Langevin constate que "toute variation d'énergie interne d'un système matériel par émission ou absorption de rayonnement est accompagnée d'une variation proportionnelle de son inertie"⁵⁵. Se posant alors la question du mécanisme de cette variation (quel qu'il puisse être en nature), il s'interrogea sur les conséquences pratiques de cette loi en passant en revue les divers domaines de la physique où des variations d'énergie peuvent se rencontrer: thermodynamique (variation de la masse d'un corps avec la température), réactions chimiques (modifications de la masse des corps composés), transformations radioactives (ici, les écarts deviennent mesurables), écarts à la loi de Prout (les poids atomiques ne sont pas des multiples entiers simples d'une même quantité). L'inertie de l'énergie permet, indique Langevin à propos de ce dernier exemple, de restaurer l'unité de la matière en énonçant que "*les écarts proviennent de ce que la formation des atomes à partir d'éléments primordiaux (par désintégration, comme nous le voyons en radioactivité, ou par un processus inverse non encore observé qui donnerait naissance aux atomes lourds), s'accompagnerait de variations d'énergie interne par émission ou absorption de rayonnement. La somme des poids des atomes formés différerait de celle des atomes transformés d'une quantité égale au quotient de la variation d'énergie par le carré de la vitesse de la lumière. Et les écarts sont tels que les énergies ainsi mises en jeu seraient tout à fait du même ordre que celles observées effectivement au cours des transformations radioactives*"⁵⁶.

Langevin termine son travail sur les implications

de l'inertie de l'énergie⁵⁷ par une vue prophétique sur "la matière, réservoir d'énergie" et sur le fait que ce qui caractérise fondamentalement un système matériel, ce n'est plus sa masse, mais "le nombre et la structure des éléments, atomes ou molécules", dont il est formé, et qui, seuls, "resteraient invariables à travers tous les changements que subirait la matière et pourraient servir à définir celle-ci". Ce qui, très en avance, indiquait la voie future de la physique nucléaire et des particules élémentaires⁵⁸.

4.6 – Mais c'est avant même d'avoir tiré toutes les conséquences physiques de l'inertie de l'énergie qu'il proposa une analyse originale du nouveau cadre conceptuel de la relativité. Ici encore, c'est la rencontre entre son propre programme et la théorie d'Einstein qui lui permit de concevoir – comme le résultat d'une méditation personnelle profonde – certains traits relatifs à la théorie, en tant que fois que cadre conceptuel, qui étaient restés inaperçus: il s'agit des problèmes de l'espace, du temps, et de la causalité. Langevin les développa en 1911, à l'occasion d'exposés destinés à des philosophes plutôt qu'à des scientifiques: l'un, au congrès de philosophie de Bologne, attirera l'attention des milieux philosophiques sur la théorie de la relativité⁵⁹; l'autre, à la Société française de philosophie, amorça en France les débats sur ces questions, préfigurant cette autre séance qui devait avoir lieu treize ans plus tard avec la participation d'Einstein lui-même aux côtés de Langevin⁶⁰. L'intérêt de ces textes dépasse de très loin la seule initiation de non scientifiques; Langevin y développe des considérations à la fois physiques et épistémologiques qui ont été depuis intégrées au corpus même de la théorie de la relativité.

Il s'attache, dans ces textes, à expliciter la différence entre les notions fondamentales des deux points de vue de la mécanique et de l'électromagnétisme, c'est-à-dire entre leurs cadres conceptuels respectifs, montrant de quelle façon les notions de la mécanique doivent être remplacées, et en tout premier lieu comment sont transformées des notions que l'on croyait si bien établies d'espace et de temps.

Dans ses considérations, Langevin ne cherche pas à remplacer un point de vue intuitif sur ces notions par un autre, qui serait adapté aux nouveaux phénomènes. Il se place d'emblée (et ceci est un trait de sa méthode en physique comme de son épistémologie) du point de vue de la théorie formalisée, qu'elle soit celle de type classique ou celle de la relativité, pour exprimer la différence profonde des deux quant aux concepts d'espace et de temps, et montrer par là les limites de leur acception intuitive. Puis, en possession de l'expression formelle des nouveaux concepts saisis dans leur différence avec les anciens, il en explicite le sens physique, c'est-à-dire leurs implications phénoménales, que l'on peut envisager dans des situations de fait (la considération de ces dernières étant dès lors propre à engendrer une nouvelle acception intuitive, par une adaptation de la pensée aux faits, qui lui paraît caractériser le mouvement d'évolution de la pensée humaine, en particulier la pensée scientifique)⁶¹.

Dans l'exposé de Bologne sur l'espace et le temps, comme dans celui de Paris, Langevin part du "fait

expérimental" de l'identité des équations représentant les lois physiques dans des systèmes de référence en mouvement inertiel, c'est-à-dire du principe de relativité (pour Einstein aussi, il s'agit, dans ce sens, d'un fait), et de sa traduction mathématique en termes d'invariance sous un groupe de transformation. Chacun des groupes proposés (celui de Galilée pour la mécanique, celui de Lorentz pour l'électromagnétisme) "diffère profondément" de l'autre "pour ce qui concerne les transformations de l'espace et du temps". Dès lors "il faut choisir: si nous voulons conserver une valeur absolue aux équations de la Mécanique rationnelle, au mécanisme, ainsi qu'à l'espace et au temps qui lui correspondent, il nous faut considérer comme fausses celles de l'Electromagnétisme, renoncer à la synthèse admirable (. . .). Si nous voulons au contraire conserver l'Electromagnétisme, il faut adapter notre esprit aux conceptions nouvelles qu'il exige pour l'espace et le temps (. . .). L'Electromagnétisme, ou des lois de Mécanique admettant le même groupe de transformation que lui, permettraient seuls d'aller plus loin⁶² et prendraient la place prépondérante que le mécanisme assignait à la Mécanique rationnelle"⁶³.

Se plaçant dans la représentation de l'univers de Minkowski, il indique comment les conceptions nouvelles permettent de rétablir la symétrie des intervalles de temps et d'espace. C'est en termes de régions de l'espace-temps déterminées par le cône de lumière (bien qu'il n'emploie pas le mot lui-même) que Langevin présente alors le problème du rapport entre les distances spatiale et temporelle – un exposé désormais classique qu'il est inutile de reprendre ici, mais où l'on voit introduites les notions de "couples (d'événements) dans l'espace", et de "couples dans le temps", que distinguent la possibilité d'une relation causale entre eux (et qui correspondent à ce qui s'est appelé ensuite: "intervalle du genre espace", et "intervalle du genre temps"⁶⁴: Dès lors la symétrie spatio-temporelle est rétablie: dans la *région espace* (où l'ordre de succession dans le temps n'a pas de sens absolu), la distance de deux événements "passe par un minimum précisément pour les systèmes de référence par rapport auxquels les deux événements sont simultanés"; dans la *région temps* (où l'ordre de succession temporel est préservé, de manière absolue), l'intervalle de temps "passe par un minimum, précisément pour le système de référence par rapport auquel les deux événements coïncident dans l'espace"⁶⁵. La définition du temps propre, lié à un système matériel, découle de ce deuxième énoncé: "il sera plus court" (au sein du système matériel) "que pour des observateurs qui seraient restés liés au système de référence en mouvement uniforme" (par rapport à lui)⁶⁶. Langevin en donne deux exemples concrets, désormais bien connus: celui de la durée de vie d'un échantillon de matière radioactive, et celui du voyageur, dit par la suite de Langevin, retrouvant une Terre vieillie de deux siècles alors qu'il l'a quittée il y a seulement deux ans. "Les faits expérimentaux les plus solidement établis de la physique nous permettent d'affirmer qu'il en serait bien ainsi", déclare Langevin⁶⁷, bien que ces expériences fussent évidemment encore bien loin de pouvoir être effectuées: c'est que ces prédictions résultent de toute la cohérence des lois de l'électromagnétisme couronnées

par la théorie de la relativité (restreinte).

En donnant de ces phénomènes d'apparence paradoxaux l'explication la plus détaillée du point de vue pratique, montrant qu'il n'y avait là rien que de très plausible, parce que conforme en tous points à une théorie bien avérée (et cette cohérence des détails entre eux indique combien elle est raisonnable), Langevin désamorçait par avance les objections que l'on n'allait pas manquer d'opposer aux conceptions nouvelles au nom du sens commun. C'est précisément ce sens commun, devait-il dire ailleurs, qui doit suivre l'évolution des idées et se renouveler. Sa description du voyageur de l'espace constitue précisément une illustration d'un tel sens commun renouvelé.

4.7 – Langevin s'est également montré attentif aux autres aspects de la théorie de la relativité au fur et à mesure de leurs développements, comme on le voit déjà par des remarques que l'on trouve dans les travaux que nous venons d'évoquer, ou encore dans une appréciation sur Einstein qu'il formula en 1913; elle se termine, après l'évocation des autres travaux du jeune savant, par celle de son approche de la relativité générale: "Enfin, M. Einstein s'occupe actuellement du problème de la gravitation, au sujet de laquelle aucun progrès n'a été réalisé depuis Newton. Pour la première fois, nous pouvons espérer, par une généralisation du principe de relativité, relier la gravitation à la grande synthèse qui comprend déjà les phénomènes de l'électromagnétisme et de l'optique"⁶⁸.

Quand ses travaux et ses enseignements reprendront normalement, après la première guerre mondiale, Langevin consacra à nouveau une part importante de ses cours et plusieurs écrits à l'exposé de la théorie de la relativité, étendue cette fois à la relativité générale⁶⁹. On y trouve toujours la même clarté d'exposition, le même sens physique qui s'appuie sur des expériences de pensées de portée fondamentale – tel, par exemple, ce boulet de Jules Verne, qu'il avait déjà évoqué incidemment en 1911⁷⁰, dans lequel les voyageurs ne ressentent pas l'action de pesanteur qu'ils éprouvent ensemble; en quelque sorte l'accélération annule la gravité⁷¹. Il donna également d'autres contributions, comme celle de l'explication relativiste de l'expérience du disque tournant de Sagnac, ou un travail sur le facteur de Thomas rapporté par Sommerfeld⁷², qui toutes manifestent la meilleure compréhension de la théorie et une interprétation très en harmonie avec celle d'Einstein. C'est encore par ses cours que les physiciens français accèdent à la théorie qui se verra peu à peu acceptée après de longues controverses sur lesquelles nous reviendrons. Langevin fut considéré par tous comme le porte-parole de la relativité et c'est à lui aussi bien qu'à Einstein qu'allaient les critiques de ceux qui y voyaient, pour les uns une nouvelle mystique, pour les autres, une atteinte au sens commun, ou qui lui reprochaient le tapage fait autour d'elle.

Pour Langevin, la théorie de la relativité constitue, par sa portée quant à la représentation physique de la matière et de l'univers, et par sa perfection propre, le "monument le plus harmonieux et le plus conforme aux faits que l'esprit des hommes aît jamais construit"⁷³. "La puissance d'explication et de prévi-

sion de cette théorie”, écrit-il dans sa conférence de 1919 sur “Le principe de relativité”, “imposée par les faits et confirmée par eux, est aussi grande que sa structure logique est rigoureuse et belle”. Décrivant la théorie développée “principalement par M. Einstein”, dont il souligne l’“admirable continuité de pensée”, il la montre se constituant en deux étapes principales, “celle de la relativité restreinte de 1905 à 1912, et depuis 1912 celle de la relativité générale”⁷⁴, et en reprend les éléments essentiels, quant à la formulation et quant aux vérifications expérimentales (qui incluent à cette date, les phénomènes intra atomiques, par la modification relativiste des orbites de Bohr). Quant à l’explication par la relativité générale de l’anomalie du mouvement du périhélie de Mercure, il écrit: “il est tout à fait remarquable que, sans introduction d’aucune hypothèse ou constante arbitraire, par le développement nécessaire de l’idée fondamentale, la théorie de la relativité généralisée apporte la solution si longtemps cherchée”⁷⁵. Cette présentation si conforme aux conceptions d’Einstein, servira en fait de modèle à toutes celles qui seront proposées ultérieurement par divers auteurs, et les traits qu’elle souligne de la relativité sont ceux sur lesquels se définiront les clivages dans les débats qui vont suivre. Disons aussi que, pour Langevin, ils correspondent en quelque sorte aux nouvelles normes épistémologiques requises d’une théorie physique; et que la relativité et son élaboration constituent un révélateur très indiqué du processus évolutif de la pensée scientifique, dont cette théorie représente “l’aboutissement actuel”⁷⁶.

NOTES

* Les références bibliographiques sont données, à la suite des notes qui y renvoient, par l’indication de l’auteur suivie de l’année de la publication et d’un éventuel indice d’ordre (ex: Langevin 1913 b). Dans les cas d’ambiguïté, c’est la date soulignée (en italiques) qui est la bonne.

1. Pour une analyse détaillée du contexte français, voir Pestre 1984.
2. Sur cet état de choses en relation aux traditions scientifiques de différents pays, voir Pyenson 1975. Poincaré ne faisait pas de distinction. De Broglie et d’autres la font (p. ex. de Broglie 1940). Sur les chaires de physique théorique dans les universités françaises, voir Pestre 1984.
3. Langevin soulignait sous ce rapport, en 1932, l’influence persistante de l’“esprit de Regnault” sur la physique française (Langevin 1932 a).

4. Ce retard se marque surtout dans les cours et les manuels d’enseignement. Sur la réception de la l’électromagnétisme de Maxwell en France, voir Abrantes 1985. En fait la théorie de Maxwell a été prise en considération assez vite par les physiciens français dans la mesure où elle était importante en optique. C’est d’ailleurs par cet aspect qu’elle avait été introduite en 1888 par Poincaré (Poincaré 1889).
5. Voir dans Pestre 1984, l’analyse des manuels d’enseignement de l’époque, et leur présentation empirico-historique de la physique, au détriment des aperçus théoriques fondamentaux; la théorie de Maxwell y est à peine mentionnée à la fin: à plus forte raison la théorie de la relativité est-elle ignorée.
6. Un bon témoin des conceptions dominantes tant physiques qu’épistémologiques au moment où la théorie de la relativité commençait sa percée est fourni par les contributions – diverses mais mon sans convergences – de Paul Painlevé, Emile Picard, Henri Bouasse, à l’ouvrage collectif *De la méthode dans les sciences*, Alcan, Paris, 1909.
7. Voir sa présentation de la théorie de la relativité dans Einstein et al. 1922.
8. Voir p. ex. Duhem 1902, p.206; 1906, p. 298; 1915. Cf. Paty 1985.
9. Langevin évoque la semaine passée avec Poincaré, lors de leur voyage aux Etats-Unis en 1904 au retour du Congrès de Saint-Louis, dans Langevin 1913 c. “J’eus l’occasion de voir”, écrit-il, “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”.
10. Poincaré 1895, 1900 a et b.
11. Voir p. ex. Poincaré 1902.
12. Poincaré 1902.
13. Poincaré 1898.
14. Poincaré 1904. Voir également Poincaré 1908, p. 249-250.
15. Poincaré 1902 a.
16. Poincaré 1902 a ed. 1968, p. 215.

17. Poincaré 1905.
18. Poincaré 1905.
19. Poincaré 1904.
20. Poincaré 1905.
21. Dont il partage ainsi la paternité avec Einstein.
22. Poincaré 1908, p. 274. Voir aussi Poincaré 1905.
23. Zahar 1983.
24. Voir Holton 1964, 1981.
25. Voir Einstein 1955, cité par Kahan 1959, p. 163.
26. Voir Poincaré 1912 b, qui comporte la seule allusion publiée par Poincaré aux travaux d'Einstein, sur sa théorie des quanta d'énergie de rayonnement. Sur le "silence" ou le "mutisme" de Poincaré sur Einstein, voir Holton 1964, Goldberg 1970.
27. Poincaré 1911.
28. Il écrivit peu après: "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". (Poincaré 1911, *ibid*).
29. Einstein, Lettre à Zangger, 16 novembre 1911, citée par Kahan 1959, et par Miller 1981, p. 255.
30. Poincaré 1902, p. 177-180.
31. Einstein 1955, *op. cit*.
32. Holton 1964 et Goldberg 1967 parlent de "gradualisme" de Poincaré pour désigner son souci de concilier, et de maintenir, le cadre et la théorie ancienne, qui exige de la théorie une "suppleness", une flexibilité qui lui permette de s'adapter sans rupture.
33. Paul Langevin (1872-1946), issu d'une famille d'artisans, fut élève de l'Ecole de Physique et Chimie de Paris et de l'Ecole Normale Supérieure. Il soutint en 1902 une thèse sur ses "Recherches sur les gaz ionisés". Il fut élu professeur remplaçant, en 1902, puis titulaire, en 1909, au Collège de France et succéda à Pierre Curie comme professeur à l'Ecole de Physique et Chimie. Ses travaux sur le magnétisme – il élaborait, sur la base de la théorie de l'électron, la théorie du *dia* et du para magnétisme – lui valurent une renommée internationale. Il participa, dès 1911, aux Conseils de physique Solvay dont il devait assurer la présidence après la mort de Lorentz, en 1928. Une vive amitié le lia, dès le Conseil Solvay de 1911 (ou il présenta sa théorie du magnétisme), à Einstein dont il avait accepté les idées sur la relativité dès 1906.
34. Cette influence fut considérable en intensité davantage qu'en ampleur, puisque les cours du Collège de France ne touchaient pas (ou très peu) les universitaires et les étudiants, et que Langevin ne se préoccupait pas de publier ses leçons dont le contenu est encore inédit. C'est dans ces cours du Collège de France qu'il développa, sans souvent les publier par ailleurs, ses idées originales sur la relativité. C'est donc marginalement à l'enseignement universitaire que la théorie de la relativité pénétra en France, mais par un canal de très haut niveau. Les cours donnés par Langevin sur la relativité, dès 1906, étaient suivis par Edmond Bauer, Emile Borel, Jean Becquerel, Jacques Hadamard, Elie Cartan. Vers le début des années vingt, on compte parmi ses auditeurs Louis de Broglie, Alfred Kastler.
35. De Broglie 1947. Langevin était en fait expérimentateur aussi bien que théoricien.
36. Albert Einstein. Lettre au Dr. A. Johnson, 7 septembre 1940, in Langevin 1972. Langevin, menacé par les occupants allemands, devait être arrêté puis placé en résidence surveillée à Troyes durant la plus grande partie de la guerre. Einstein multiplia les démarches pour lui obtenir une invitation aux Etats-Unis. Voir Langevin 1972.
37. Lettre d'Einstein à la mort de Langevin, in Langevin 1972.
38. Langevin 1904 b.
39. Langevin 1904 b.
40. Le travail de Langevin s'inscrit dans une perspective de critique de rôle fondamental de la mécanique (cf. Langevin 1904 a, p. 440, 441).
41. Langevin 1904 b, p. 16. Il faut, certes, préciser un modèle de l'électron, mais il influe peu sur la première propriété, l'inertie (p. 21), puisque l'inertie résulte de la charge électrique (cf. *supra*).
42. Langevin 1904 b, p. 32-33.
43. Langevin 1904 b, p. 33.
44. C'est ici que Langevin propose son modèle de l'électron déformable à volume constant (*ibid*, p. 37). Voir aussi Langevin 1905 a.
45. Langevin 1904 b, p. 69.
46. Lorentz 1904.
47. Cette expérience fut réalisée en 1903. Voir une description dans Miller 1981, p. 68-69. Curieusement, Miller ne mentionne aucunement l'explication de Langevin. D'une manière générale, cet auteur semble ramener les contributions de Langevin à la relativité au seul modèle de l'électron déformable de Bücherer-Langevin. Tonnelat (1971) est également muette sur ce travail de Langevin, comme sur les autres contributions de celui-ci contemporaines du travail fondateur d'Einstein.

48. Langevin 1905 a. Langevin reprend dans cet article des résultats obtenus deux ans auparavant et présentés dans son cours du Collège de France, donc en 1903-1904. Ces résultats ont été publiés en partie, indépendamment, par Liénart en 1898 et par Schwarzschild en 1903 (Langevin les mentionne).
49. Langevin 1905 a in Langevin 1950, p. 313 (C'est cette édition que nous citerons).
50. Ibid, p. 314.
51. Langevin 1905 a, p. 328.
52. Bauer, cité dans Langevin Luce 1972, p. 5-6.
53. Voir Paty 1982.
54. Langevin 1913 b. Nous suivons l'édition de 1923.
55. Langevin 1913 b, p. 391. La formule est évidemment $D m_0 = D E_0/c^2$.
56. Langevin 1913 b, p. 399. Remarquons toute fois qu'Einstein, des 1905 (article sur l'inertie de l'énergie) avait mentionné la probabilité de vérifier.
57. Il évoque en outre la pesanteur de la lumière en mentionnant les recherches en cours d'Einstein, et conclut sur le caractère général de la relation $E = mc^2$, pour les corps en repos ou en mouvement.
58. Ibid., p. 402.
59. Au témoignage notamment de Bergson (Bergson 1922), qui dit par ailleurs tout ce que les penseurs intéressés à la théorie de la relativité doivent aux travaux et à l'enseignement de Langevin.
60. Langevin 1911 b. Sur la séance de 1922, voir Paty 1980.
61. L'épistémologie de Langevin s'est élaborée en même temps que son programme scientifique. Elle est axée, à mon sens, autour de deux considérations: c'est la théorie qui octroie aux concepts leur signification; la pensée humaine et les théories qu'elle produit sont évolutives, marquées par une "adaptation progressive de la pensée aux faits".
62. D'aller plus loin que la validité approchée de la mécanique, dans le cas des faibles vitesses.
63. Langevin 1911 a, p. 274; voir aussi Langevin 1911 b, p. 300-304.
64. Langevin 1911 a, p. 286-287.
65. Langevin 1911 a, p. 287-288; Langevin 1911 b, p. 339.
66. Langevin 1911 a, p. 291.
67. Ibid., p. 294.
68. Langevin, document adressé à l'assemblée générale du Collège de France pour inviter Einstein, cité par Luce Langevin 1972, p. 7. Einstein a exposé sa théorie de la gravitation au Congrès scientifique de Vienne, en 1913. Cette même année, précisément, Einstein mentionne dans une lettre à Michele Besso l'intérêt de Lorentz et de Langevin pour ses théories (Lettre 9, de la fin 1913, in Einstein Besso 1972).
69. En 1919-1920: cours sur la relativité; en 1920-1921: cours sur la gravitation. En 1919, Langevin écrit un petit ouvrage de synthèse sur la relativité où figure le résultat de l'observation de l'éclipse (Langevin 1919). Voir également Langevin 1922 b et l'exposé de Langevin dans Einstein et al. 1922.
70. Langevin 1911 a, p. 290.
71. Langevin 1919, p. 49. A l'intérieur du boulet, comme le champ de pesanteur est annulé par la chute, l'univers est euclidien et la lumière se propage en ligne droite.
72. Sur l'expérience de Saganac et son interprétation par Langevin, voir plus bas, et Langevin 1921.
73. Langevin 1922, p. iv. Voir aussi Bauer 1922 b, p. 35, qui consonne bien avec les conceptions de Langevin.
74. Langevin 1919 (ed 1922), p. 5-6.
75. Ibid, p. 59.
76. Voir p. ex Langevin 1919, p. 6.

BIBLIOGRAPHIE

- ABRANTES, Paulo Cesar Coelho. *La Réception en France des théories de Maxwell concernant l'électricité et le magnétisme*. Thèse pour le doctorat de 3ème cycle, Université de Paris I, 1985 (miméo, non publié).
- BERGSON, Henri. *Durée et simultanéité. A propos de la théorie d'Einstein*, Alcan, Paris, 1922; 2e éd. 1923; 3e éd. 1925; 4e éd. 1929.
- BROGLIE, Louis de. "Allocution pour le jubilé de M. Emile Borel, prononcée à la Sorbonne le 14 janvier 1940" (1940), in de Broglie 1951 a, p. 290-297.
- BROGLIE, Louis de. "La vie et l'oeuvre de Paul Langevin" (1947), in de Broglie 1951 a, p. 233-269.
- DUHEM, Pierre. *Le Mixte et la combinaison chimique. Essai sur l'évolution d'une idée*, Naud, Paris, 1902.

- DUHEM, Pierre. *La Théorie physique. Son objet, sa structure* (1906). Ré-ed. Vrin, Paris, 1981.
- DUHEM, Pierre. "Quelques réflexions sur la science allemande". *Revue des deux mondes*, février 1915, 657-686.
- EINSTEIN, Albert, et al. "La théorie de la relativité", Séance du 6 avril 1922, *Bulletin de la Société française de philosophie*, XVII, 1922, 91-113. Ré-ed. *La Pensée*, n° 210, février 1980, 12-29.
- EINSTEIN, Albert; Besso, Michele. *Correspondance 1903-1955*. Traduction, notes et introduction de Pierre Speziali, Hermann, Paris, 1972; ré-ed., 1979.
- GOLDBERG, Stanley. "Henri Poincaré and Einstein's theory of relativity", *American Journal of Physics*, 35, 1967 (n° 10, october), 934-944.
- GOLDBERG, Stanley. "Poincaré's silence and Einstein's relativity", *The British Journal for the History of Science*, 5, n° 17, 1970, 73-84.
- HOLTON, Gerald. "On the thematic analysis of science: the case of Poincaré and relativity", in *Mélanges Alexandre Koyré, L'aventure de l'esprit*, Hermann, Paris, 1964, vol. II, p. 257-268. (Voir aussi G. Holton, *Thematic origins of scientific thought; Kepler to Einstein*, Harvard Univ. Press, Cambridge (Mass), 1973; en français, le chapitre "Aux origines de la théorie de la relativité restreinte", in G. Holton. *L'Imagination scientifique*, Gallimard, Paris, 1981, p. 130-184).
- KAHAN, Theo. "Sur les origines de la théorie de la relativité restreinte", *Revue d'histoire des sciences*, 12, 1959.159-163.
- LANGEVIN, Luce. "Paul Langevin et Albert Einstein d'après une correspondance et des documents inédits", *La Pensée*, n° 161, février 1972, 3-40.
- LANGEVIN, Paul. "L'esprit de l'enseignement scientifique", Conférence faite au Musée pédagogique, le 18 février 1904, in *L'Enseignement des sciences mathématiques et des sciences physiques* (Ouvrage collectif), Imprimerie nationale, Paris, 1904; also in Langevin 1923, p. 424-453. (a).
- LANGEVIN, Paul. "La physique des électrons", Rapport présenté au *Congrès international des sciences et des arts, Saint-Louis, Etats-Unis*, 23 septembre 1904; also in *Revue Générale des Sciences*, 15 mars 1905; also in Langevin 1923, p. 1-69. (b).
- LANGEVIN, Paul. "Sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique", *Journal de Physique*, 4, 1905, 165; also in Langevin 1950. p. 313-328. (a).
- LANGEVIN, Paul. "L'évolution de l'espace et du temps", Conférence au Congrès de Philosophie de Bologne, 1911; *Scientia*, 10, 1911, 31; also in Langevin 1923, p. 265-300 (a).
- LANGEVIN, Paul. "Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne", *Bulletin de la Société française de philosophie*, 10, 1911, 31; also in Langevin 1923, p. 301-344 (b).
- LANGEVIN, Paul. "L'inertie de l'énergie et ses conséquences", Conférence à la Société française de physique le 26 mars 1913. *Journal de Physique théorique et appliquée*, Nelle Série, 3, 1913, 553-591; also in Langevin 1923, p. 345-405; also in Langevin 1950, p. 397-426 (b).
- LANGEVIN, Paul. "Le principe de relativité", Conférence à la Société des électriciens en décembre 1919; publié comme livre, *Le principe de relativité*, Chiron, Paris, 1922; repr. in Langevin 1950, p. 436-466.
- LANGEVIN, Paul. "Sur la théorie de la relativité et l'expérience de M. Sagnac", *CRAS*, 173, 1921, 831-834; also in Langevin 1950, p. 467-469 (a).
- LANGEVIN, Paul. "Préface" à: Edmond Bauer, *La Théorie de la relativité*, Eyrolles, Paris, 1922, p. i-iv (a).
- LANGEVIN, Paul. *La physique depuis vingt ans*, Doin, Paris, 1923.
- LANGEVIN, Paul. "La physique au Collège de France", in (Collectif), *Le Collège de France (1530-1930). Livre jubilaire composé à l'occasion de son quatrième centenaire*, Presses Universitaires de France, Paris, 1932, p. 61-79 (a).
- LANGEVIN, Paul. *La Pensée et l'action*. Textes recueillis et présentés par Paul Labérenne, Editeurs français réunis, Paris, 1950; Editions Sociales, Paris, 1964 (a).
- LANGEVIN, Paul. *Oeuvres scientifiques*. Ed. du C.N.R.S., Paris, 1950 (b).
- LANGEVIN, Paul et DE BROGLIE, Maurice (dirs.). *La Théorie du rayonnement et les quanta*. Rapports 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.
- LORENTZ, Hendrik Antoon. "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light", *Kon. Akademie van Wetenschappen Amsterdam. Proceedings of the Section of Science* (in english), 6, 1904, 809-831. (Orig. neerl. 23 avril 1904, vol. 12, 1904, 896-1009).

- MILLER, Arthur I. *Albert Einstein's special theory of relativity. Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading (Mass.), 1981.
- PATY, Michel. "Sur le réalisme d'Albert Einstein", *La Pensée*, n° 204, avril 1979, 18-37.
- PATY, Michel. "Einstein et la philosophie en France: à propos du séjour de 1922", *La Pensée*, n° 210, février 1980, 3-12.
- PATY, Michel. "Mach et Duhem. L'épistémologie de savants-philosophes", *Manuscrito* 1986 (sous presse).
- PESTRE, Dominique. *Physique et physiciens en France, 1918-1940*, Ed. des Archives Contemporaines, Paris, 1984.
- POINCARÉ, Henri. *Cours de physique mathématique. I. Leçons sur la théorie mathématique de la lumière*, professées pendant le premier semestre 1887-1888 à la Faculté des Sciences de Paris. Rédigées par J. Blondin Carré, Paris, 1889.
- POINCARÉ, Henri. "La mesure du temps", *Revue de Métaphysique et de Morale* VI, 1898 (janvier) 1-13; in Poincaré 1905 (c).
- POINCARÉ, Henri. "Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique", in *Rapports présentés au Congrès international de physique de 1900*, Paris, 1900. In Poincaré 1902 (chap. 9 N 10). (a).
- POINCARÉ, Henri. "La théorie de Lorentz et le principe de réaction", *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 2^e série, 5, 1900, 252-278; également in Poincaré 1950-1965, vol. 9, p. 464-488. (b)
- POINCARÉ, Henri. *Cours de physique mathématique. Electricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques*, 2^e éd., Carré et Naud, Paris, 1901.
- POINCARÉ, Henri. *La Science et l'hypothèse (1902)*, Flammarion, Paris, 1968.
- POINCARÉ, Henri. "L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique", Exposé au Congrès International des Arts et des Sciences, Saint-Louis (Etats-Unis) 24 sept. 1904. *Bulletin des sciences mathématiques* 28, 1904, 302-324; in Poincaré 1905.
- POINCARÉ, Henri. *La Valeur de la science (1905)*, Flammarion, Paris, 1970.
- POINCARÉ, Henri. "Sur la dynamique de l'électron" (reçu le 23 juillet 1905), *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, XXI, 1906, 129-176; également dans Poincaré 1924, p. 18-76; également dans Poincaré 1950-1965, vol. 9, p. 494-550.
- POINCARÉ, Henri. *Science et méthode*. Flammarion, Paris, 1908.
- POINCARÉ, Henri. "Lettre à Pierre Weiss" (de recommandation sur Albert Einstein novembre 1911), in Académie Royale des Sciences, des Lettres et Beaux-Arts de Belgique, *Einstein et la Belgique*, Exposition, Bruxelles, Palais des Académies, 16 mai-19 juin 1979.
- POINCARÉ, Henri. "La mécanique nouvelle". Conférence à l'Association française pour l'Avancement des Sciences, Lille, 1909, *Revue d'Electricité* 13, 1910, 23-28, dans Poincaré 1924, p. 1-17.
- POINCARÉ, Henri. "L'Espace et le temps", Conférence donnée le 4 mai 1912 à l'Université de Londres, in Poincaré 1913. (a).
- POINCARÉ, Henri, "Les rapports de la matière et de l'éther", *Journal de physique* 2, 1912, 347; in Poincaré 1913. (b).
- POINCARÉ, Henri. *Dernières pensées*, Flammarion, Paris, 1913; ré-ed. 1963.
- POINCARÉ, Henri, *La Mécanique nouvelle. Conférence, mémoire et note sur la théorie de la relativité*. Introd. de M. Edouard Guillaume, Gauthier-Villars, Paris, 1924.
- POINCARÉ, Henri. *Oeuvres*, publiées par Paul Appell (t. 1), G. Darboux (t. 2), la section de géométrie de l'Académie des Sciences (t. 3-11), 11 vols., Gauthier-Villars, Paris, 1950-1965.
- PYENSON, Lewis. "La réception de la relativité généralisée: disciplinarité et institutionnalisation en physique", *Revue d'histoire des sciences* 28, 1975, 61-73.
- SCHILPP, Paul-Arthur (ed.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949; 3rd. ed. 1970.
- TONNELAT, Marie-Antoinette. *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris, 1971.
- ZAHAR, Elie. "Poincaré's independent discovery of the Relativity principle", *Fundamenta Scientiae* 4, 1983, 146-176.