

Groupe d'études « La philosophie au sens large »

Animé par Pierre Macherey

19/12/2007

Einstein, Poincaré : retour sur ne controverse

Françoise Balibar

La paternité de la théorie de la relativité restreinte

La célébration en 2005 du centenaire de *l'annus mirabilis* d'Einstein, et par là –même de la naissance de la théorie de la relativité restreinte, célébration mondialement orchestrée en vue de redorer le blason, mondialement terni, de l'enseignement de la physique, a donné lieu, en France (et uniquement en France) à une guerre picrocholine dont l'enjeu était la « véritable » paternité de la fameuse théorie. Einstein en est-il vraiment l'inventeur ? Ne conviendrait –il pas de rendre (enfin) à César ce qui est à César, autrement dit, rétablir Henri Poincaré, notre génie national, dans ses droits d'auteur de la théorie dite « de la relativité restreinte » ?

Que les tenants de la thèse visant à établir la priorité de Poincaré fassent preuve d'une agressivité bruyante et désordonnée qui semble, a priori, mal convenir à l'établissement de la « vérité », ne doit pas empêcher de poser la question ... et d'essayer d'y voir plus clair. Il serait trop facile de rejeter cette thèse au motif des excès auxquels se livrent certains de ses défenseurs. Ainsi Jules Leveugle [1], polytechnicien à la retraite depuis de nombreuses années, inventant un scénario délirant selon lequel Hilbert et Planck, les deux manitous de la science allemande du début du XXème siècle, furieux de ce que la « découverte » de la théorie -- qui, telle une lampe à huile dans un site archéologique préexistait à sa découverte, attendant son découvreur – ait été réalisée par Poincaré, un Français, et donc ait échappé à l'Allemagne, auraient passé un contrat avec un jeune chômeur diplômé, Einstein, lequel se serait vu promettre un poste dans l'université allemande en échange de sa complaisance à bien vouloir réécrire « en d'autres termes » la communication qu'avait faite Poincaré à l'Académie des sciences de Paris en juin 1905, comptant sur la rapidité de publication des revues allemandes pour coiffer Poincaré sur le poteau.

Que des entreprises « révisionnistes » de ce type, visant à « rétablir la vérité », et se présentant pour cela comme la dénonciation d'une usurpation scandaleuse [2], aient manifestement une composante revancharde [3] ne doit pas non plus nous retenir d'aller y voir de plus près.

D'autant que ce n'est pas la première fois que des voix s'élèvent pour contester que la découverte de la théorie de la relativité restreinte soit l'œuvre d'Einstein. En effet, dès 1953, un mathématicien et physicien anglais réputé, Edmund Whittaker publiait un livre en deux volumes intitulé *A History of Theories of Aether and Electricity*. Whittaker est le premier à avoir relevé chez Poincaré, antérieurement à 1905, les occurrences de l'expression « principe de relativité ». Expression qu'Einstein reprend à son compte dans son célèbre article publié en septembre 1905 (envoyé fin juin) -- sans se l'attribuer, mais sans citer Poincaré non plus, dans lequel il l'a pourtant trouvée (Einstein avait lu *La Science et l'Hypothèse*, best-seller de Poincaré, paru en 1902, traduit en allemand dès 1904). Whittaker ne s'attarde pas sur ce qu'il considère manifestement comme un manquement véniel, aux règles de la profession. En revanche, il examine en détail les contributions de Poincaré et d'Einstein ; et comme, contrairement à Leveugle (qui « a « fait taupe » puis a exercé le métier d'ingénieur), il est un professionnel de ce dont il parle (il a enseigné les mathématiques et l'astronomie pendant quarante ans aux universités de Cambridge, Dublin et Edimbourg), il ne lui échappe pas que les deux contributions sont très différentes. Ce n'est pas lui qui se ridiculiserait en affirmant que le mémoire d'Einstein de 1905 est une « réécriture » de la communication de

Poincaré. Mais à l'inverse, il est tellement familier avec la théorie d'Einstein, laquelle occupe le devant de la scène depuis 1905 et qu'il a probablement enseignée lui-même, qu'il ne peut s'empêcher de chercher dans Poincaré des éléments proprement einsteiniens. C'est ainsi par exemple que le « principe de relativité » se trouve énoncé dans des termes qui ne sont pas ceux de Poincaré, mais ceux-là même qu'utilise Einstein dans la transcription qu'il en fait [4], en changeant la signification. Autrement dit, visant à réévaluer la contribution de Poincaré, il fait de celui-ci un précurseur d'Einstein—ce dont Poincaré aurait été fort étonné, si l'on songe qu'il a observé sur la théorie d'Einstein un silence qui en dit long : loin d'y retrouver « ses petits », Poincaré considérait la théorie d'Einstein comme à cent lieux de la sienne.

Instruite par la lecture de Whittaker, je vais essayer de développer le point suivant : Poincaré n'est nullement un précurseur d'Einstein, ni Einstein l'auteur d'un plagiat ; les deux théories sont différentes non seulement par leur formalisme (ce que Leveugle ne voit même pas, s'arrêtant au fait que la même formule finale, celle des transformations dites de Lorentz, se trouve chez l'un et chez l'autre, sans chercher à comprendre comment elle a été démontrée chez l'un et chez l'autre, différence qui n'a pas échappé à Whittaker), mais également par la manière d'aborder puis de traiter le problème (je me poserai d'ailleurs la question de savoir s'il s'agit bien du *même* problème).

Quel était le problème en 1905 ?

Tout d'abord, quel était le problème ? La réponse à cette question, quand on la pose aujourd'hui dans l'intention de raconter l'histoire de la théorie de la relativité, est généralement la suivante : au tournant du siècle, la physique était dans une crise, due au fait que la théorie de la lumière développée par Maxwell vers 1850, faisant de la lumière un champ électromagnétique, était en contradiction flagrante avec le « principe de relativité », l'un des principes sur lesquels avait été construite au cours des siècles (depuis Galilée) la mécanique, devenue théorie de la matière envisagée comme un agrégat de « particules » soumises aux lois de Newton. Cette contradiction (que l'on peut caractériser comme une contradiction entre la théorie de la lumière et la théorie de la matière), susceptible d'une formulation mathématique précise (j'y reviendrai), se manifestait « physiquement » par le fait que, dans la théorie de Maxwell, la propagation de la lumière était conçue comme la mise en branle progressive, de proche en proche, d'un milieu, l'éther luminifère, support universel de l'entité physique « lumière », et à ce titre « absolu », c'est-à-dire absolument immobile -- propriété que le principe de relativité interdit strictement [5]. Le problème est alors (ou plutôt était alors) de savoir s'il convient d'étendre les exigences du principe de relativité à la théorie de la lumière (étant entendu que jusqu'en 1900, le principe de relativité ne régissait que la théorie de la matière), ou si, au contraire, il faut admettre qu'il ne contraint que la mécanique et pas la théorie de la lumière – ce qui revient à renoncer à l'unité de la physique, comme science à la fois de la matière et de la lumière.

Telle est la présentation actuelle du problème. Présentation trompeuse car elle est induite et instruite par la connaissance que nous avons, cent ans après, de la manière dont Einstein a résolu l'embarras dans lequel se trouvaient les physiciens à l'époque. Attaqué sous cet angle, le problème n'a qu'une solution : celle proposée par Einstein. Mais le « génie » d'Einstein a consisté précisément à attaquer le problème par ce biais, et pas par un autre : il a inventé une formulation du problème, à laquelle il a été capable de donner une réponse. Ce qui ne veut pas dire qu'il n'existait pas d'autres formulations possibles, et même des formulations permettant elles aussi de tirer la physique hors du borbier dans lequel elle se trouvait empêtrée. Cent ans d'enseignement de la théorie de la relativité d'Einstein nous font considérer que le problème se posait nécessairement (ou naturellement) dans les termes choisis par Einstein. Il n'en est rien.

Poincaré : un problème de physique mathématique

Précisément, Poincaré, à la suite de, et en collaboration avec, H. A. Lorentz, a posé le problème en d'autres termes, équivalents mais non identiques. Ayant lui-même travaillé dans le domaine de la théorie des groupes, telle qu'elle avait été développée à la fin du XIX^{ème} siècle par Sophus Lie et Felix Klein, Poincaré était enclin à penser qu'un problème de « physique mathématique » (Poincaré n'aime pas le mot « théorie »), à laquelle il avait consacré une grande partie de son temps entre 1880 et 1900, était caractérisé par le groupe des transformations qui laissent invariantes les équations régissant le phénomène étudié (ou ce qui revient au même, les solutions de ces équations [6]). Or, le problème que cherchait à résoudre Poincaré en 1905 était, comme l'indique le titre de ses contributions, celui de la « dynamique de l'électron ». Il s'agissait pour lui de déterminer le mouvement d'un électron (particule de matière porteuse d'une charge électrique) soumis au champ électromagnétique qu'il produit lui-même du fait qu'il est en mouvement (ceci, en vertu de ce que l'on peut considérer comme un des théorèmes essentiels de la théorie électromagnétique de Maxwell). Traduit en termes mathématiques, cet énoncé du problème devient, dans la conception qu'a Poincaré de la physique mathématique : déterminer le groupe des transformations d'espace et de temps qui laissent les équations régissant la dynamique de l'électron invariantes. C'est ce que, dans la communication qu'il fait à l'Académie des Sciences le juin 1905 [7], il annonce avoir réussi à établir. Et le principe de relativité dans tout cela ? Apparemment il a disparu. En réalité, il a servi de point de départ, non pas en tant que « principe (au sens étymologique de commandement et commencement) mais sous la forme d'un *postulat*. La différence est de taille : un postulat ne commande rien ; il demande ; en l'occurrence, le « postulat de relativité » demande d'admettre qu'il « est impossible de mettre expérimentalement en évidence le mouvement absolu d'un corps ». Énoncer un postulat, c'est se placer dans le cadre d'une stratégie bien précise, celle qui porte le nom de « méthode d'induction » et que l'on peut décrire ainsi : on « remonte » de façon déductive, selon les règles de la logique, aux conditions qui doivent être remplies pour que le postulat puisse être « démontré », c'est-à-dire établi, par une démarche déductive à rebours de la précédente. Comme le dit Poincaré, on cherche ce qu'impliquerait la « vérité » du postulat ; on cherche à en « développer les conséquences », en espérant que de ces « conséquences » on pourra déduire une « explication » du postulat ; en somme, on cherche à « démontrer » le postulat.

C'est dans cette stratégie qu'intervient la détermination des transformations qui laissent invariantes les équations (et leurs solutions) décrivant la dynamique d'un électron – ce qu'on appelait aussi à l'époque l'électrodynamique des corps (sous-entendus électrisés) en mouvement. Poincaré, après avoir établi la forme mathématique de ces transformations (qu'il baptise « transformations de Lorentz », en hommage à son collègue), démontre que ces transformations non seulement « rendent compte » de l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu, mais qui plus est, sont les seules à pouvoir en rendre compte. À partir de ce moment, le « postulat de relativité » est établi et libre à ceux que cela intéresse d'en faire un principe (au sens de commencement et commandement) si cela leur change, c'est-à-dire, selon les règles de l'épistémologie de Poincaré, si cela leur est commode.

Einstein : refonder la théorie physique

Einstein, justement, fait de ce postulat, d'entrée de jeu, un *principe*, c'est-à-dire un énoncé qui n'a pas à être démontré (un « axiome », dira-t-il plus tard) dont il développe les conséquences logiques, pour aboutir à des lois (ce que les géomètres grecs appelaient des théorèmes), suivant en cela ce qu'il est convenu d'appeler la « méthode déductive ». Même si les lois en question sont susceptibles d'une formulation mathématique (les fameuses formules de transformation « de Lorentz ») identique à celle à laquelle aboutit Poincaré, il y a là une première différence, différence de méthode, qui crève les yeux.

Mais la différence n'est pas que de méthode : les deux théories (un mot que n'aimait pas Poincaré, qui préférerait parler de « problème à résoudre ») n'ont pas la même ambition. Comme l'indiquent leurs titres respectifs : « Sur la dynamique de l'électron » dans le cas de Poincaré,

« Electrodynamique des corps en mouvement » chez Einstein. Non seulement le second titre ouvre une plus large perspective (l'électron est remplacé par les corps), mais surtout, il s'agit dans le cas d'Einstein de bâtir une électrodynamique, c'est-à-dire une théorie englobant à la fois l'électromagnétisme et la *dynamique*, la théorie de la lumière et la théorie de la matière ; il ne s'agit pas de développer une réflexion *sur* le mouvement de l'électron, mais bien de construire une théorie unifiant l'électromagnétisme de Maxwell et la dynamique de Newton, dont le mouvement de l'électron sera une application, parmi d'autres. Ambition gigantesque qui n'évite le ridicule que parce qu'elle s'est trouvée justifiée : le travail d'Einstein aurait pu tout aussi bien avorter, ou n'accoucher que d'une théorie éphémère vite jetée à la poubelle des théories fausses.

On dit souvent que la différence entre Poincaré et Einstein tient à ce que l'un adopte un point de vue de mathématicien et l'autre un point de vue de physicien. Cette manière de dire les choses -- outre qu'elle est imprécise puisqu'on ne sait pas ce qu'est un point de vue de mathématicien ou un point de vue de physicien (le premier serait-il plus « abstrait » que le second ? mais alors que veut dire « abstrait » ? ; le second met l'accent sur les choses, les données expérimentales, le premier sur les relations ; mais alors que sont ces « choses » dont-on parle ?) -- ne résiste pas à un examen plus approfondi des théories produites par l'un et l'autre. Cet examen fait apparaître que le plus théoricien des deux n'est pas celui qu'on croit et que celui qui tient le plus compte des données expérimentales n'est également pas celui qu'on imagine. C'est ainsi que Poincaré, on l'a vu, invoque comme point de départ de sa réflexion, l'impossibilité de mettre en évidence *expérimentalement* le mouvement absolu de la Terre (allusion aux expériences de Michelson et Morley), alors que chez Einstein cette circonstance ne joue qu'un rôle secondaire, adventice. Einstein commence en effet par repérer des « asymétries » gênantes dans la manière de penser (avant 1905) le mouvement des corps électrisés, autrement dit, son travail est motivé par les défauts ou *insuffisances de la théorie* ; « les vaines tentatives », en vue de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre, ne sont invoquées qu'en second lieu. Et c'est l'ensemble de ces circonstances, qui le conduit à introduire le « principe de relativité ». lequel -- outre qu'il est un principe et non un postulat comme il a déjà été signalé -- n'a pas le même contenu que le « postulat » énoncé par Poincaré : contrairement à ce « postulat », le « principe » d'Einstein ne fait aucune référence à l'expérience ; il est entièrement théorique : « dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont valables, les lois de l'optique et de l'électrodynamique, elles aussi, sont les mêmes ». Il s'agit d'équations (celles de l'électromagnétisme et celles de la mécanique), et non de mise en évidence expérimentale.

L'écart entre Poincaré et Einstein : la refonte du concept de « vitesse »

Essayons d'identifier plus finement la différence entre les deux théories. L'une et l'autre sont unitaires : elles visent à réduire l'incompatibilité entre la mécanique et l'électromagnétisme. Pour Poincaré, on l'a vu, cette réduction peut s'opérer en déterminant le groupe des invariances qui est commun à l'électromagnétisme et à la mécanique, celui qui structure la dynamique d'un corps électrisé, problème où les deux théories, la mécanique et l'électromagnétisme, interviennent toutes les deux. Pour Einstein, la réduction de l'incompatibilité passe par une réflexion préalable sur la nature des « choses » dont les deux théories, la mécanique et l'électromagnétisme, sont les représentations, la matière et la lumière. Plus exactement, pour Einstein, la solution du problème auquel se trouvent confrontés les physiciens, passe par une réflexion préalable sur les concepts mathematico-physiques par lesquels on représente la matière et la lumière : des corpuscules dans un cas, des ondes dans l'autre. La différence essentielle entre ces deux concepts est que le premier relève du discontinu (les corpuscules, peuvent être comptés ; ils sont localisés ; ils décrivent au cours du temps des trajectoires qui sont des lignes) et le second du continu (les ondes sont définies dans tout l'espace et à tout instant, leur progression est frontale, elles se superposent en sorte qu'on ne peut les compter « une à une »).

Mais la réflexion d'Einstein ne s'arrête pas à ces différences premières, descriptives. Enfoncé sous ces premières évidences, Einstein, exhume une différence conceptuelle qui, elle, concerne le concept de « *vitesse* », concept proprement physique, puisque aussi bien c'est en définissant le concept de vitesse instantanée (différent de la notion non théorique de vitesse moyenne) que Galilée a fondé la science moderne. La vitesse (instantanée, celle de Galilée) est le premier des concepts de cette nouvelle science *more mathematico* qu'est la physique post-galiléenne. Mais précisément parce que le concept mathématique-physique de vitesse est né dans le cadre de la mécanique, que devient-il en dehors de ce cadre d'origine ? Peut-on l'étendre tel quel à l'électromagnétisme ? Ou encore : que devient le concept de vitesse lorsqu'on a affaire non pas à des particules mais à des ondes – et plus généralement à des champs (le mot « onde » décrivant de fait l'évolution spatio-temporelle d'un champ) ? En particulier, *peut-on parler comme d'une chose allant de soi, de « la vitesse de la lumière », de quoi s'agit-il exactement ?*

Il me semble que la grande différence entre Poincaré et Einstein se situe à cet endroit : Einstein introduit la « vitesse de la lumière » (il en fait même l'objet d'un « principe ») ; Poincaré n'en parle pas ; pour lui, la vitesse est un paramètre caractérisant les transformations qu'il étudie et dont il précise la structure de groupe. C'est peut-être là que se situe la différence entre le point de vue d'un mathématicien et celui d'un physicien : dans cette attention constante au contenu « matériel [8] » des concepts mathématique-physique sur lesquels travaille la physique. On sait, en tout cas, qu'Einstein, adolescent, se demandait comment il verrait le monde s'il chevauchait une onde électromagnétique (une onde de lumière ?). À cette première interrogation sur ce que signifie l'expression « vitesse » de la lumière, était venue s'en ajouter une autre, plus instruite, provoquée par la découverte, quelques mois avant la rédaction de l'article princeps sur l'électrodynamique des corps en mouvement, de ce que la lumière pourrait bien être de nature granulaire : la question de la « vitesse » de ces grains devenait alors cruciale.

Je terminerai donc cet exposé par une tentative en vue de rendre sensible l'inadéquation du concept de « vitesse » appliqué à un champ (ou d'onde) – question que l'on hésite à qualifier de philosophique, car elle ne l'est que dans la mesure où celle de l'« intuition » est une question éminemment philosophique. Question centrale, en tout cas, dans l'élaboration de la théorie de la relativité par Einstein [9].

La lumière, en effet, ne se **déplace** pas, elle se **propage**, et cet état de choses oblige à reconsidérer le concept de vitesse. Car le concept de vitesse, défini par Galilée et élaboré par toute la mécanique, est celui d'une vitesse de déplacement, intrinsèquement lié à l'idée de corpuscule (concentration de masse sur un petit volume que l'on peut assimiler à un point géométrique) : la vitesse de ce corpuscule est définie comme le rapport de la longueur parcourue par cet objet au temps mis à parcourir la distance considérée. Dans le même ordre d'idées, à la lumière ne correspond **aucun trajet**, défini comme une trajectoire, concept proprement corpusculaire, défini comme la suite des positions occupées à des instants successifs par un corpuscule. Le problème de la « vitesse de la lumière » est alors celui de la description de l'évolution dans le temps d'un objet qui ne peut pas être identifié à un corpuscule ; comment définir le taux d'évolution dans le temps de ce changement dans l'espace ? En d'autres termes, il convient d'analyser l'expression vague de « **vitesse de propagation** » couramment employée -- dont une vague déferlant sur la plage donne une idée intuitive. Il convient de dégager ce qui, sous une même dénomination, « vitesse », fait la différence entre une vitesse de déplacement et une vitesse de propagation.

Une manière de penser la « vitesse » d'une onde en restant au plus près de ce que décrit le concept mécanique de « vitesse », vitesse de déplacement d'un objet, consiste à mettre l'accent sur le fait qu'une onde qui se propage transporte de l'énergie (circonstance qu'exploitent les surfers qui se laissent porter par une vague). Se fait alors jour une contradiction entre le concept intuitif d'onde (comme déplacement d'énergie) et sa définition mathématique comme être occupant tout l'espace,

sans début ni fin dans le temps. De façon plus précise : l'énergie d'une onde, à chaque instant, au lieu d'être répartie dans tout l'espace comme le voudrait la définition mathématique du concept d'onde (couvrant tout l'espace et n'ayant ni commencement ni fin), se trouve concentrée en un volume restreint de l'espace, lequel change de « position » au cours du temps.

Si la lumière était véritablement une onde, au sens mathématique du terme, cette énergie devrait être uniformément répartie dans tout l'espace ; or, de fait, elle se trouve concentrée sur un volume fini et cette concentration spatiale d'énergie change de « position » au cours du temps. Il y a là une contradiction que la physique mathématique de la deuxième partie du XIX^{ème} siècle avait partiellement résolue en en donnant une explication. Explication qui repose sur une propriété (mathématique et physique) constitutive du concept d'onde, à savoir le fait que deux ondes en un même point au même instant, se superposent (au lieu d'entrer en collision comme le feraient des particules). Cette superposition donne lieu au phénomène d'interférences (celui-là même qui est décrit dans l'enseignement élémentaire à propos de la lumière). Qui dit interférences dit zones d'accumulation (les « franges brillantes » du lycée) séparées par des zones de raréfaction – et même d'annulation (les « franges sombres »). La lumière (comme toute autre superposition d'ondes mathématiques) se trouve ainsi présenter des zones d'accumulation, de maximum approximatif, où se trouve concentrée l'énergie, laquelle énergie est « transportée » lorsque ces zones d'accumulation évoluent au cours du temps, à une « vitesse » qui est la « vitesse de propagation » -- que l'on peut dès lors définir comme le rapport entre la longueur parcourue par le maximum d'accumulation au temps mis à parcourir cette longueur, selon une procédure analogue à celle qui permet de définir une vitesse de déplacement pour un corpuscule.

C'est là – et on ne le dit pas assez, qu'intervient l'éther qui devient de ce fait incontournable. Car l'accumulation précédemment décrite en certains endroits (avec annulation corrélative en d'autres endroits) ne peut se produire que si l'onde se propage dans un « milieu » matériel, lequel (par l'effet de l'interaction matière/rayonnement) décale, déphase en somme, les ondes participant à la superposition, et produit l'interférence. D'où la nécessité de l'éther, milieu matériel sans lequel la propagation de la lumière dans le « vide » reste inconcevable. D'où le fait aussi, qu'Einstein, « prévenu » en quelque sorte de ce que la propagation de la lumière pourrait peut-être présenter un caractère corpusculaire (les guillemets sont là pour signaler qu'il ne peut pas s'agir d'un corpuscule du même type que ceux qui constituent la matière), ait souhaité bâtir une théorie en posant au départ un axiome portant sur cette soi-disant vitesse de la lumière plutôt que d'essayer de déduire cette propriété à partir d'un quelconque « modèle » théorique (onde ou corpuscule, ou autre chose) de la lumière. Ce en quoi, évidemment il prenait un chemin radicalement différent de celui emprunté par Poincaré pour qui la propriété en question (son invariance par transformation de Lorentz) de la « vitesse de la lumière » -- ou plus exactement d'une certaine constante intervenant dans les équations de Maxwell, identifiée par Maxwell à une « vitesse » -- devait apparaître comme une conséquence de la structure de groupe de la théorie.

Notes

[1] Jules Leveugle, *La Relativité, Poincaré et Einstein, Planck, Hilbert : histoire véridique de la théorie de la relativité* (2004)

[2] Les titres des ouvrages ayant allumé la querelle parlent d'eux-mêmes : Jean - Paul Auffray *Comment je suis devenu Einstein : la véritable histoire de $E = mc^2$* , (2005) ; Jan Hadlik, *Comment le jeune et ambitieux Einstein s'est approprié la Relativité Restreinte de Poincaré*, (2004).

[3] Revanche nationaliste dans le cas de Leveugle, cherchant à rétablir l'Ecole Polytechnique et à travers elle la France (à moins que ce ne soit la France et à travers elle l'Ecole Polytechnique) dans leurs droits. Revanche sur l' « establishment » de la physique » dans le cas de Jean-Paul Auffray, mais aussi de personnalités telles que Maurice Allais (prix Nobel d'Economie) et Claude Allègre (ancien ministre) qui, avec l' autorité que leur confère leur notoriété en économie ou en politique, déclarent qu'il faut se rendre à l'évidence : Einstein n'a pas découvert la théorie de la relativité. Information reprise par le Club de l'Horloge qui invite ses adhérents à la diffuser largement

[4] Whittaker : « Ce principe, comme son auteur (Poincaré) le souligne, requiert que des observateurs en mouvement de translation relatif donnent une même forme à l'expression des lois de la nature ». Il s'agit là mot pour mot de la version einsteinienne du principe, qu'on ne trouve pas, sous cette forme, chez Poincaré. Cité par Elie During, dans son travail de thèse (13 décembre 2007) : « De la relativité à l'espace-temps. Bergson entre Einstein et Poincaré », p. 315.

[5] Le principe de relativité, énoncé par Galilée, dit que le mouvement d'un corps matériel observé dans un certain « référentiel » (c'est-à-dire repéré par rapport à un certain système d'axes) est le même que celui repéré par rapport à un autre « référentiel » en translation uniforme par rapport au premier (le mouvement d'une souris dans la calle d'un bateau est le même par rapport à la calle que le bateau soit à quai ou en route à vitesse uniforme). Il existe donc une classe de référentiels (en translation uniforme les uns par

rapport aux autres), qui sont équivalents pour la description du mouvement d'un corps, en ce sens que cette description est la même dans tous les référentiels de la classe. Ce qui exclut la possibilité pour un corps d'être dans un état de repos « absolu » : il ne l'est que par rapport à, *relativement* à un certain référentiel (il est en mouvement par rapport au reste de la classe d'équivalence).

[6] Un mot d'explication est nécessaire. Lorsque l'on dit que les équations de Maxwell « donnent » le champ en tout point de l'espace à un instant donné (en fonction de la distribution des charges et des courants), on veut dire que les équations de Maxwell sont des équations aux dérivées partielles (les dérivées étant prises par rapport aux variables d'espace et de temps) ; que leur solution (obtenue par des techniques usuelles de calcul différentiel et intégral) est donc une fonction de ces mêmes variables ; et que cette fonction, en tant qu'elle est solution des équations de Maxwell et pas d'autres équations, représente le champ électromagnétique en chaque point et à chaque instant dans la situation considérée. C'est en ce sens que l'on peut comprendre le mot de Hertz affirmant que « la théorie de Maxwell ce sont les équations de Maxwell ». Ce qui vaut pour la théorie de Maxwell vaut pour toute autre théorie, reposant sur la résolution d'équations aux dérivées partielles.

Cela dit, on peut chercher à mieux caractériser ces solutions en tant qu'elles satisfont à telle équation aux dérivées partielles bien particulière. On conçoit qu'une telle caractérisation puisse être obtenue en déterminant l'ensemble des transformations des variables d'espace et de temps qui laissent ces solutions inchangées, invariantes ; ces transformations reflètent en quelque sorte la structure propre à la théorie considérée. En ce sens, une théorie de physique mathématique est définie par l'ensemble (le groupe) des transformations d'espace et de temps qui laissent invariantes ses équations (et leurs solutions). Ces transformations forment un groupe (au sens mathématique du terme), lequel constitue en quelque sorte la carte d'identité des équations aux dérivées partielles considérées (par exemple, les équations de Maxwell, ou celles de la dynamique newtonienne).

[7] Dont il tirera ensuite durant l'été un article, publié seulement en 1906 dans les *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, t. 21, p. 129-176, sous le titre « Sur la dynamique de l'électron ».

[8] L'adjectif « matériel » est ici avancé faute de mieux. « Ontologique » serait peut-être plus approprié. En tout état de cause, il s'agit d'éviter la référence à l'expérimentation. Le contenu dont il est question se situe tout d'abord dans l'imagination, pour autant qu'il soit possible de « situer » quelque chose « dans » l'imagination (ou la pensée, si l'on préfère). « Intuitif » est peut-être le bon adjectif.

[9] Question centrale aussi, comme l'on sait, dans l'élaboration de la théorie quantique, vingt ans plus tard : les relations