

Elie During

LANGEVIN OU LE PARADOXE INTROUVABLE

Article à paraître dans la *Revue de métaphysique et de morale*, 2014

RÉSUMÉ. – C'est à l'occasion de sa conférence au Congrès de philosophie de Bologne de 1911 que le physicien Paul Langevin présente le célèbre « paradoxe des jumeaux » désormais associé à son nom. C'est du moins ce qui se dit. En réalité, la version qu'il en donne alors ne comporte ni jumeaux ni paradoxe. D'Einstein (1905) à Bergson (1922), le paradoxe s'est constitué et consolidé à travers une série de relais. On en retrace ici l'histoire tout en reconnaissant l'importance du « moment Langevin » pour la réception philosophique de la théorie de la relativité.

ABSTRACT. – The famous « twin paradox » was first presented in 1911 by French physicist Paul Langevin at the Philosophical Conference in Bologna. Or so it is said. In fact, the version given that day bears no mention of any twin or paradox. From Einstein (1905) to Bergson (1922), the paradox consolidated itself through a series of relays, the history of which is told here without downplaying the importance of the « Langevin moment » in the philosophical reception of relativity theory.

La « foire aux idées »

Dans son compte-rendu du Congrès de Bologne, paru en 1911 dans la *Revue philosophique*, le philosophe des sciences Abel Rey livrait une réflexion quelque peu désabusée sur l'utilité des grands congrès internationaux. Ces événements, expliquait-il, hésitent entre deux modèles : celui du séminaire interne cher aux sociétés savantes – à l'image de la Société française de philosophie, cheville ouvrière du Congrès de 1911 –, et celui de la leçon magistrale ou de la conférence qui, dans le cadre de « grandes séances d'apparat », permet à d'illustres orateurs de se succéder au pupitre comme des vedettes. Cet exercice a ses limites, puisque « faute d'avoir pu réfléchir d'avance à ce que le conférencier vous apporte », la discussion est, en général, « d'une joyeuse stérilité¹ ». En somme, les congrès internationaux tiennent à la fois de l'académie et de la foire. Et de la visite d'une foire – fût-elle une « foire aux idées² » – on ne retient généralement que les

¹ Abel Rey, « Le congrès international de philosophie – Bologne, 6-11 avril 1911 », *Revue philosophique*, 72, juillet 1911, p. 2.

² *Ibid.*, p. 4.

effets les plus spectaculaires : les disputes, les formules fortes, les images frappantes et paradoxales.

Rien d'étonnant, dès lors, si de l'admirable conférence prononcée le 10 avril 1911 en séance générale par le physicien Paul Langevin – invité au Congrès aux côtés d'autres savants : Enriques, Poincaré, Ostwald –, la communauté philosophique a surtout retenu un paradoxe qui demeure aujourd'hui associé à son nom : le fameux « paradoxe des jumeaux », également appelé « paradoxe de Langevin ». Une énigme demeure pourtant, car de jumeaux il ne fut jamais question ce jour-là, pas plus d'ailleurs que de paradoxe.

L'exposé, intitulé « L'évolution de l'espace et du temps³ », avait pour sujet l'impact des nouvelles théories physiques – et plus spécialement la première théorie de la relativité d'Einstein, celle de 1905 – sur les notions d'espace et de temps. Il s'agit de la première présentation de cette ampleur en langue française, la première aussi à s'adresser directement à un public de non spécialistes, à une époque où le nom d'Einstein n'est encore connu que d'un petit cercle d'initiés, contrairement à ce qui sera le cas dix ans plus tard, au moment de la diffusion de la relativité générale, et notamment de la tournée parisienne orchestrée par Langevin en avril 1922⁴. Titulaire d'une chaire de physique générale et expérimentale au Collège de France, ce dernier avait eu l'occasion d'enseigner la relativité pendant l'année 1910-1911⁵. Propagandiste de la première heure, traducteur de Sommerfeld et de Minkowski, il ne découvre pas cette théorie de seconde main : aux dires d'Einstein, il s'en est fallu de peu qu'il ne l'ait créée lui-même quelques années plus tôt. La clarté de son exposé de Bologne en fait un modèle du genre : sans perdre de vue l'ancrage expérimental de la théorie et son inscription dans le contexte plus général des remaniements de l'électromagnétisme, Langevin parvient à rendre compte de ses fondements conceptuels (principe de relativité, principe de localité) tout en faisant

³ Paul Langevin, « L'évolution de l'espace et du temps », *Revue de métaphysique et de morale*, 19 (4), 1911. Cet article constitue la version courte d'un texte publié *in extenso* dans *Scientia*, 19 (3), p. 31-54, et repris dans Paul Langevin, *La Physique depuis vingt ans*, Paris, Doin, 1923, p. 265-300 (voir également Paul Langevin, *Propos d'un physicien engagé pour mettre la science au service de tous*, B. Bensaude-Vincent (éd.), Paris, Vuibert/SFHST, 2007, p. 109-131).

⁴ Voir Michel Paty, « Einstein et la philosophie en France : à propos du séjour de 1922 », *Cahiers Fundamenta Scientiae*, 93, 1979, p. 23-41 ; Michel Biezunski, *Einstein à Paris : le temps n'est plus*, Saint-Denis, Presses universitaires de Vincennes, 1991 ; Vincent Borella, *L'Introduction de la Relativité en France, 1905-1922*, Lille, Presses Universitaires du Septentrion, 2000.

⁵ Voir *La Physique de Paul Langevin : un savoir partagé*, Paris, Bibliothèque de l'ESPCI, 2005, p. 47 et 89. Et sur Langevin plus généralement, Bernadette Bensaude-Vincent, *Langevin (1872-1946) : science et vigilance*, Paris, Belin, 1987.

entrevoir les bouleversements considérables qu'elle entraîne pour la physique, et peut-être pour la philosophie elle-même, pour autant que celle-ci soit prête à reconnaître dans l'espace et le temps autre chose que des formes *a priori*. Tel est en effet le programme que condense le titre de la conférence. Il définit ce qu'on pourrait appeler un réalisme critique ou évolutif, dont on trouvera un écho chez Abel Rey⁶ et bientôt chez Bachelard.

Le voyage en boulet

Mais c'est surtout l'« exemple frappant » développé à la fin de l'exposé que nous retenons aujourd'hui. Il y est question d'observateurs en mouvement relatif, et aussi d'une expédition spatiale à bord d'un « projectile », manifestement inspirée par le récit de Jules Verne, *De la Terre à la Lune*. Voici ce que Langevin a dit, *verbatim* :

« Il résulte de ce qui précède que ceux-là auront moins vieilli dont le mouvement pendant la séparation aura été le plus éloigné d'être uniforme, qui auront subi le plus d'accélération.

Cette remarque fournit un moyen concevable, à celui qui voudrait y consacrer deux années de sa vie, de savoir ce que sera la Terre dans deux cents ans, d'explorer l'avenir de la Terre en faisant dans la vie de celle-ci un saut en avant qui pour elle durera deux siècles et pour lui durera deux ans, mais ceci sans espoir de retour, sans possibilité de venir nous informer du résultat de son voyage, puisque toute tentative de ce genre ne pourrait que le transporter de plus en plus avant dans l'avenir de la Terre.

Il suffirait pour cela que notre voyageur consente à s'enfermer dans un projectile que la Terre lancerait avec une vitesse suffisamment voisine de la lumière, quoique inférieure, ce qui est physiquement possible, en s'arrangeant pour qu'une rencontre, avec une étoile par exemple, se produise au bout d'une année de la vie du voyageur et le renvoie vers la Terre avec la même vitesse. Revenu à la Terre ayant vieilli de deux ans, il trouvera en sortant de son arche notre globe vieilli de deux cents ans si sa vitesse est restée dans l'intervalle inférieure d'un vingt-millième seulement à la vitesse de la lumière.⁷ »

Cette présentation contraste avec celle qu'on trouve dans la plupart des ouvrages de vulgarisation, qui mettent en scène les aventures de deux frères jumeaux, dont l'un (le voyageur) semble avoir vieilli moins rapidement que l'autre (le sédentaire) en vertu des accélérations subies au cours de son périple dans l'espace. Ce n'est que par un effet de rétrospection qu'on attribue à Langevin la version habituelle du paradoxe. On objectera à

⁶ Abel Rey, *La Théorie de la physique chez les physiciens contemporains*, Paris, Alcan, 2^e éd., 1923.

⁷ Paul Langevin, « L'évolution de l'espace et du temps », *art. cit.*, p. 466.

bon droit que l'essentiel se trouve tout de même bien *in nucleo* chez Langevin, dans cette parabole qu'il intitule lui-même « le voyage en boulet ».

Peut-être, mais les jumeaux manquant à l'appel, le paradoxe n'a d'existence que virtuelle. Dans la version standard qui s'est finalement imposée, en effet, la gémellité est loin d'être une clause accessoire, destinée tout au plus à rehausser le récit d'une touche pittoresque. Elle introduit une notion de réciprocité qui est la condition même du paradoxe. Celui-ci n'apparaît à proprement parler qu'à partir du moment où la situation met explicitement en scène le caractère interchangeable de deux observateurs en mouvement relatif, au prix d'un effet de symétrie illusoire puisque, on le verra, les observateurs ne sont en réalité nullement interchangeables. Le meilleur moyen de suggérer cette symétrie est de les envisager en quelque sorte comme des répliques ou des *duplicata* l'un de l'autre. Le paradoxe peut alors se formuler très simplement : si le mouvement est bien relatif, comme nous le savons depuis Descartes et Galilée, mais surtout comme Einstein semble le confirmer en élevant le principe de relativité au rang d'axiome de la nouvelle cinématique, on ne voit pas pourquoi le jumeau voyageur ne se considérerait pas lui-même comme immobile relativement à une Terre en mouvement, de sorte que tout ce qui peut se dire de lui vaudrait aussi, réciproquement, de son double. Sous ce nouveau point de vue, c'est le jumeau resté sur Terre qui devrait avoir moins vieilli. En situation de mouvement relatif, tous les observateurs sont également « voyageurs ». Les deux raisonnements paraissant également valables, il faut en conclure que chacun se retrouve plus jeune que l'autre, ce qui est une contradiction manifeste.

Or c'est précisément cette équivoque que Langevin s'emploie à lever d'emblée. Il lui suffit pour cela de rappeler qu'en dépit du fait que les deux observateurs se sont éloignés *l'un de l'autre* (réciproquement), il existe entre eux une « dissymétrie » essentielle, « tenant à ce que le voyageur seul a subi, au milieu de son voyage, une accélération qui change le sens de sa vitesse et le ramène au point de départ sur la Terre⁸ ». Comme le dira Whitehead quelques années plus tard : ils n'ont pas vécu la même histoire relativement à l'univers pris dans son ensemble⁹.

Les jumeaux n'étant pas convoqués comme tels à la conférence de Bologne, il est finalement logique qu'il n'y soit pas non plus question de « paradoxe ». Si l'expérience de

⁸ « L'évolution de l'espace et du temps », in *La Physique depuis vingt ans, op. cit.*, p. 296.

⁹ Alfred N. Whitehead, « The Problem of Simultaneity », *Relativity, Logic, and Mysticism. Aristotelian Society Supplementary Volume III*, 1923, p. 34-41.

pensée en forme d'apologue a de quoi faire tourner les têtes, Abel Rey ne prend même pas la peine de l'évoquer dans son compte-rendu pour la *Revue philosophique*. Même silence dans la revue *Nature*, qui évoque pourtant avec un certain détail la conférence de Langevin¹⁰. La vraie surprise de Bologne est celle d'un paradoxe introuvable : un « paradoxe des jumeaux » sans jumeaux ni paradoxe...

Bergson, le temps local et la solidarité des durées

Dans l'assistance, ce jour-là, se trouvait pourtant un auditeur particulièrement attentif aux virtualités paradoxales du « voyage en boulet » : il s'agit de Bergson, qui devait prononcer à quelques heures de distance une conférence sur les rapports entre science et philosophie¹¹. L'intervention de Langevin fit sur lui forte impression ; elle résonnait avec les préoccupations qui étaient les siennes depuis qu'il s'était penché, dans *Matière et mémoire* puis dans *L'Évolution créatrice*, sur la délicate question de l'unité du temps matériel au sein d'un univers caractérisé par une pluralité de rythmes de durée, mais aussi sur l'idée d'un absolu du mouvement saisi en durée, irréductible au cadrage référentiel imposé par le principe du mouvement relatif. Une note de *Durée et simultanéité*, l'ouvrage de 1922 consacré aux théories d'Einstein, évoque le rôle d'intercesseur joué par Langevin : « Nous saisissons cette occasion de dire que c'est la communication de M. Langevin au Congrès de Bologne qui attira jadis notre attention sur les idées d'Einstein. On sait ce que doivent à M. Langevin, à ses travaux et à son enseignement, tous ceux qui s'intéressent à la théorie de la Relativité¹². » Cet hommage appuyé nous

¹⁰ « The International Philosophical Congress at Bologna », *Nature*, 86 (2168), May 18, 1911, p. 399-400.

¹¹ Il s'agit de « L'intuition philosophique », texte reproduit dans *La Pensée et le mouvant* [1934], Paris, PUF, 2009, p. 117-142.

¹² Henri Bergson, *Durée et simultanéité* [1922], Paris, PUF, 2009, p. 81. Cette note intervient dans un passage spécialement consacré à l'analyse du « voyage en boulet ». Bergson n'est pas le seul philosophe à avoir été incité par Langevin à s'attaquer aux reliefs escarpés de la relativité. C'est un entretien avec le physicien français, la veille de l'arrivée d'Einstein à Paris en 1922, qui décidera Emile Meyerson à se pencher à son tour sur le dossier. Son ouvrage de 1925, *La Déduction relativiste*, apparaît à ce titre comme un des effets retardés du Congrès de Bologne : « C'est M. Langevin qui nous a fourni une partie de la documentation dont nous avons fait usage [...] et qui nous a constamment aidé à vaincre les difficultés techniques qui se présentaient. » (Émile Meyerson, *La Déduction relativiste*, Paris, Payot, 1925, p. xv). Notons cependant que Meyerson, contrairement à Bergson, ne fait pas grand cas du paradoxe des jumeaux dans ses analyses.

invite à relire sa polémique avec les einsteiniens comme l'effet d'un dialogue différé et finalement manqué avec le physicien français.

Il n'est pas exagéré de dire que Bergson a vu dans le « voyage en boulet » l'équivalent physique, sur le terrain même de la durée, de ce que sont les paradoxes de Zénon pour la pensée du mouvement¹³. Il y va pour lui d'un problème proprement cosmologique, touchant le mode de totalisation des durées de l'univers. En effet, comment donner à l'univers « une figure » si les durées locales ne cessent de se désaccorder, à l'image des temps déphasés des observateurs terrestres et spatiaux ? Comment concevoir leur unité disjonctive autrement que dans la forme d'un espace-temps à quatre dimensions, qui n'est après tout qu'une nouvelle manière de géométriser le temps ? Bergson ne peut s'y résoudre. Il n'est donc pas question pour lui d'accepter telle quelle la proposition faite par Langevin, quelques mois après le Congrès de Bologne, aux collègues philosophes réunis à la Société française de philosophie¹⁴ : identifier purement et simplement le temps vécu, le temps des consciences, à ce que le physicien conçoit comme un « temps propre¹⁵ ».

L'assimilation de la durée à une série d'instants structurellement homologues à l'ensemble des nombres réels, traduite géométriquement dans le cadre d'un espace à quatre dimensions, ne pouvait certes pas satisfaire le philosophe qui cherchait à saisir la coexistence réelle des durées en-deçà de leurs projections spatiales. Mais Bergson avait par

¹³ On aura peut-être remarqué que le paradoxe dit « du stade », avec ses vitesses relatives indexées à des longueurs parcourues (qui font conclure qu'« une durée est double d'elle-même »), fait directement écho aux questions relativistes touchant la mesure du temps. Ce n'est pas un hasard si Bergson voit dans ce paradoxe le plus instructif des arguments de Zénon, mettant en pleine lumière le postulat dissimulé par les trois autres (*Matière et mémoire* [1896], Paris, PUF, 2009, p. 214-215).

¹⁴ Voir « Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne », *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, 12, 1912, p. 1-46 (séance du 19 octobre 1911). Ce jour-là, Bergson n'était pas présent ; la discussion avec lui eut bien lieu, mais *in absentia*.

¹⁵ Langevin définit le temps propre : « l'intervalle de temps entre deux événements qui coïncident dans l'espace, qui se passent en un même point pour un certain groupe d'observateurs ». Et voici ce qu'il explique à la Société française de philosophie : « Le temps du philosophe correspond à la succession d'une série très particulière d'événements, ceux qui s'enchaînent dans une même portion de matière ou dans une même conscience et se confond, au point de vue de la mesure, avec ce que nous appellerons le « temps propre » de cette portion de matière ; nous aurons à nous poser la question de comparer les temps propres de diverses portions de matière en mouvement les unes par rapport aux autres. » (« Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne », cité dans le dossier critique de *Durée et simultanéité*, *op. cit.*, p. 375). Cette solution concordiste contraste vivement avec la fin de non-recevoir opposée par Einstein à Bergson le 6 avril 1922 : « Il n'y a donc pas un temps des philosophes ; il n'y a qu'un temps psychologique différent du temps du physicien » (cité in *Durée et simultanéité*, *op. cit.*, p. 398).

ailleurs critiqué avec la dernière énergie le « mécanisme cinématographique de l'intelligence » qui commande les figures globales du temps-cadre, principe de coordination et d'homogénéisation des flux de durée hétérogènes¹⁶. Or le temps propre introduisait justement sur le terrain de la mesure une nouvelle figure du temps : un *temps local* ajusté aux qualités intrinsèques du mouvement, un temps émancipé de la référence externe, taillé en quelque sorte « sur mesure ». Ce temps, il n'est pas certain que Bergson en ait saisi toutes les implications, et on ne peut qu'être surpris de l'obstination avec laquelle il s'emploie à le refouler en l'intégrant à sa critique généralisée du cinématographe intérieur, en l'alignant systématiquement sur les illusions de perspective associées aux temps relatifs. Ces derniers sont en effet typiquement des temps globaux, cadrant la totalité de l'espace sous le point de vue défini par un référentiel. On peut cependant risquer une interprétation plus charitable. Bergson a peut-être perçu dans la figure mathématique du temps local une conception trop étroite de la temporalité, incapable de répondre aux attentes liées à la conception commune du temps, et notamment au souci de rendre pensable le devenir de l'univers comme tel, saisi en extension comme une totalité concrète. Un temps-fibre confiné à de minces canaux de causalité, des profils spatio-temporels déliés de toute notion objective de simultanéité, pouvaient-ils satisfaire l'ambition cosmologique du philosophe d'appréhender le temps dans toutes ses dimensions, y compris dans sa dimension latérale, comme enveloppe de coexistence pour des durées hétérogènes ? Il ne faut pas chercher ailleurs les raisons de l'attachement de Bergson à une certaine idée du « temps universel ». Ce dernier n'est certes plus le temps absolu de Newton – Bergson a suffisamment insisté là-dessus –, mais il en conserve la fonction générale : rendre concevable l'essentielle solidarité des durées qui tissent l'univers matériel.

Or, c'est un fait, le « paradoxe » de Langevin constitue une promotion spectaculaire du temps local. Le différentiel de vieillissement ne fait à cet égard que présenter sous une forme frappante un des résultats fondamentaux et sans doute les plus troublants de la théorie d'Einstein : non pas la relativité des mesures de temps au choix d'un système de référence (avérée par la célèbre « relativité de la simultanéité » entre événements distants), mais plus profondément la relativité des durées (ou « temps propres ») aux chemins d'espace-temps parcourus (« lignes d'univers »). Ce qu'illustre le « voyage en boulet »,

¹⁶ Voir Élie During, « Vie et mort du cinématographe : de *L'Évolution créatrice* à *Durée et simultanéité* », in Bergson, C. Riquier (dir.), Paris, Cerf, 2012.

c'est le fait – expérimentalement vérifié quelques décennies plus tard¹⁷ –, que la distribution particulière des intensités cinématiques (vitesses, accélérations) qui identifie un système en mouvement est intrinsèquement liée aux conditions qui permettent d'évaluer sa durée et de la comparer à d'autres. Par « durée », on entend justement ici le « temps propre », variable locale associée à un processus périodique quelconque mesuré sur place, sans distance. Une horloge immobile à chaque instant par rapport à un système physique (ou voyageant avec lui, ce qui revient au même), mesure le temps propre de ce système. Plus l'horloge s'écarte de l'état de mouvement uniforme, plus son mouvement est varié, plus le temps qu'elle marque « retarde » par rapport à celui d'une horloge en mouvement uniforme. Dans le cas de deux observateurs qui se séparent pour se trouver réunis quelque temps plus tard, le déphasage des durées écoulées pour chacun manifeste le caractère absolu du temps local. Ce temps-là n'est plus relatif au choix d'un référentiel, c'est un temps intrinsèque, irréductible au temps global défini par des procédés de coordination à distance.

Au fond, le « voyage en boulet » illustre une situation générale : les horloges ne battent généralement pas en rythme. Que le temps physique soit relatif, il n'y a là rien de particulièrement étonnant si l'on songe à la part de convention qui entre dans toute définition globale du temps. La vraie surprise concerne ce temps local indexé aux « trajectoires » d'espace-temps (« lignes d'univers ») ; c'est là qu'a lieu le bouleversement de la notion commune du temps, si profondément attachée à l'idée de simultanéité ou de coordination globale des durées. Livrés aux vicissitudes du mouvement local, les temps propres des observateurs ne cessent de se désaccorder ou de se déphaser.

Consolidation et diffusion du paradoxe

Cette nouvelle figure du temps devient inéluctable dans le cadre de la théorie de la relativité générale, c'est-à-dire généralisée aux mouvement quelconques (accélérés). Pourtant les scientifiques eux-mêmes eurent quelque difficulté à en prendre toute la mesure. Ce n'est pas d'un coup qu'on se défait des intuitions globales qui soutiennent

¹⁷ Par l'expérience de Hafele-Keating, en 1971. L'expérience d'Ives-Stilwell (1938), ou celle, souvent citée, de Rossi-Hall (1941), ne concernent pas directement le paradoxe des jumeaux, mais seulement l'effet perspectif de « dilatation des durées » dans le cas de deux systèmes en mouvement relatif uniforme (par exemple, un muon émis dans la haute atmosphère et un laboratoire terrestre).

encore les temps relatifs, soumis à des effets de perspective cinématique et variablement « dilatés ». L'histoire complexe de la constitution du « paradoxe des jumeaux de Langevin » en témoigne¹⁸. Cet objet, on l'a dit, est introuvable en 1911 : Langevin ne parle pas de jumeaux, et il ne prétend pas présenter un paradoxe – à moins de l'entendre au sens faible, celui d'une vérité qui heurte le sens commun ou contrarie un projet métaphysique. En vérité, le récit du « voyage en boulet » ne fait que donner un tour imagé à un résultat qu'Einstein avait déjà mis en évidence dans son article fondateur de 1905 sur l'électrodynamique des corps en mouvement en faisant remarquer cette « conséquence singulière » : une horloge qui décrirait une courbe fermée pour revenir à son point de départ retarderait sur celle qui n'aurait pas bougé, et ce dans une proportion exactement définie par les équations de Lorentz¹⁹. Cette idée revient dans les années suivantes sous diverses formes (dont la fameuse expérience du disque tournant » relatée dans le livre de vulgarisation de 1917²⁰). L'allocution de Bologne n'a donc pas valeur d'origine. Elle innove cependant, et pique la curiosité des philosophes, en introduisant des consciences humaines capables de confronter le temps mesuré à leur temps vécu, là où Einstein envisageait tout au plus des organismes vivants. Dans une conférence prononcée à Zürich en janvier 1911 et publiée au mois de novembre de la même année, Einstein imaginait en effet, pour accentuer la « drôlerie » de la chose (« *am drolligsten* »), l'hypothèse d'un animal enfermé dans une boîte, et dont les mouvements physiologiques rempliraient la fonction d'une horloge. Pour un tel organisme se déplaçant à une vitesse proche de la lumière, expliquait-t-il, le temps du voyage aller-retour pourrait n'avoir duré qu'un instant, tandis que son homologue immobile, qu'on suppose de constitution identique, aurait déjà été remplacé par plusieurs générations de descendants²¹. Dans la même conférence, Einstein précisait que l'on sort à strictement parler du cadre de la

¹⁸ Tout comme nombre de restitutions actuelles, qui mélangent dans un même développement des analyses en temps local avec des considérations liées à la « dilatation des durées », c'est-à-dire aux phénomènes de distorsion perspective affectant le temps global ou « impropre ».

¹⁹ Albert Einstein, « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement », in *Œuvres choisies*, F. Balibar (éd.), 1989, vol. 1, p. 42-43.

²⁰ Albert Einstein, *La Théorie de la relativité restreinte et générale*, trad. J. Rouvière, Paris, Gauthier-Villars, 1921, chap. 23.

²¹ « Die Relativitätstheorie », *Naturforschende Gesellschaft in Zürich*, 56, 1911, p. 1-14. Voir Albert Einstein, *The Collected Papers of Albert Einstein*, J. Stachel (éd.), vol. 3, Princeton, N.J., Princeton University Press, 1992, p. 348-349.

relativité restreinte dès lors qu'on fait intervenir des référentiels accélérés. Ce point est discutable, et son opinion à ce sujet a varié plus d'une fois²².

Langevin, donc, apparie le temps de la conscience avec celui de la matière en introduisant des protagonistes humains en place des horloges. Mais si l'on cherche à présent les *jumeaux*, ce n'est pas avant 1918 qu'on les trouvera, sous la plume de Hermann Weyl. Dans *Raum, Zeit, Materie*, paru en traduction française en 1922, Weyl parle de « 2 jumeaux » (« *zwei Zwillingbrüdern*²³ ») momentanément séparés : tandis que l'un reste au pays, immobile dans son système de référence, l'autre « entreprend des voyages avec une vitesse (relative à sa patrie) voisine de celle de la lumière » ; lorsque les deux frères sont à nouveau réunis, le voyageur est « appréciablement plus jeune que son frère sédentaire²⁴ ». L'exemple est généralisable à tout type de processus, s'il est vrai que « la vie d'un homme peut très bien être comparée à une horloge ». Max Born fera à son tour mention de jumeaux dans son ouvrage de 1920 sur la théorie de la relativité²⁵.

Quant au *paradoxe*, c'est von Laue qui emploie pour la première fois le terme en 1912, en l'attribuant à Langevin²⁶. Il insiste au passage sur le fait qu'il est toujours possible en principe de rendre les phases d'accélération aussi petites qu'on voudra (relativement aux phases de mouvement uniforme), de sorte qu'à la limite, la ligne d'univers coudée du voyageur dans l'espace-temps corresponde à deux mouvements inertiels successifs, avec un changement de référentiel instantané à mi-parcours. On trouve là en germe la version épurée, idéalisée, du paradoxe des jumeaux. Elle circule parfois dans la littérature sous l'appellation de « paradoxe des trois horloges » (lorsqu'abandonnant les observateurs humains, on se contente d'assigner une horloge distincte à chaque tronçon de mouvement uniforme). Mais c'est certainement à Paul Painlevé, mathématicien renommé et homme politique, que revient le mérite de l'avoir formulé en toute clarté à

²² Voir Peter Pesic, « Einstein and the twin paradox », *European Journal of Physics*, 24, 2003, p. 585–590.

²³ *Raum, Zeit, Materie : Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie* [1918], Berlin, Springer, 1919 (3^e éd.), p. 158.

²⁴ *Temps, Espace, Matière*, trad. G. Juvet et R. Leroy, Paris, A. Blanchard, 1922, p. 163.

²⁵ Max Born, *Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen* [1920], Berlin, J. Springer Verlag, 1922 (3^e éd.), p. 194.

²⁶ Max von Laue, « Zwei Einwände gegen die Relativitätstheorie und ihrer Widerlegung », *Physikalische Zeitschrift*, 13, 1912, p. 118-120 ; *Das Relativitätsprinzip*, Braunschweig, F. Vieweg, 1913 (2^e éd.), p. 43 et 57-58.

l'occasion de la visite d'Einstein au Collège de France, le 5 avril 1922²⁷. Pour la commodité de la démonstration, Painlevé remplace l'astronaute par un chef de train muni d'une horloge, et la Terre par une gare ; il envisage le temps propre écoulé entre deux passages en gare successifs du même rapide en mouvement uniforme. Cette situation semble conduire à une absurdité manifeste, puisqu'en ne prenant en compte que des vitesses relatives, les observateurs du train et ceux de la gare devraient logiquement s'attribuer réciproquement un retard d'horloge. L'objection est en substance la même que celle que von Laue anticipait dix ans plus tôt en évoquant pour la première fois une apparence de « paradoxe » ; formulée en présence d'Einstein, elle prend un tour particulièrement vif. La discussion s'avère d'ailleurs profitable, puisqu'elle offre l'occasion de dissiper le malentendu sur lequel repose le prétendu paradoxe. L'erreur, en deux mots, consiste à raisonner comme si nous avions affaire non pas à trois mais à deux systèmes de référence en mouvement relatif : « la gare, le rapide à l'aller et le rapide au retour, constituent réellement non pas deux mais trois systèmes différents, qui ont chacun leur temps propre²⁸ » ; or cela implique que l'un au moins des deux observateurs change de référentiel (fût-ce instantanément), subissant du même coup une accélération bien réelle au moment de rebrousser chemin. Le fait qu'il existe, du point de vue cinématique, une stricte symétrie entre les segments d'espace-temps pris deux à deux, ne change rien à cette dissymétrie globale, dissymétrie que Langevin, dans la version développée de sa conférence, prenait soin d'établir sous la forme d'une application numérique en recourant à l'hypothèse d'un échange de signaux continu entre la Terre et le voyageur (avec effet Doppler).

L'échange Einstein-Painlevé fut, aux dires des témoins, le point culminant des discussions du Collège de France. Il faut croire que la solution sur laquelle les savants se sont rapidement accordés n'a pas entièrement convaincu Bergson²⁹. *Durée et simultanéité*

²⁷ Voir Charles Nordmann, « Einstein expose et discute sa théorie », *Revue des deux mondes*, 9, 1922, 143-152 (cité in *Durée et simultanéité*, *op. cit.*, p. 402-409). Une première confrontation avait eu lieu sur le même sujet en 1921 entre Langevin et Painlevé lors de rencontres à la Sorbonne à l'occasion d'un nouveau congrès international des sociétés de philosophie (voir André Lalande, « Philosophy in France, 1921 », *The Philosophical Review*, 31 (6), p. 559). Que Painlevé ait cru bon de renouveler sa critique en 1922 témoigne du fait que les idées relativistes n'étaient pas si faciles à assimiler, même par les meilleurs esprits.

²⁸ Charles Nordmann, *art. cit.*, cité in *Durée et simultanéité*, *op. cit.*, p. 407.

²⁹ Sur ce point, Bergson croit pouvoir renvoyer dos-à-dos Painlevé et Einstein. Voir *Durée et simultanéité*, *op. cit.*, p. 185 (appendice I).

rouvre le débat quelques mois plus tard, reformulant obstinément le paradoxe en termes de mouvements relatifs et de déformations perspectives en principe réciproques, donc susceptibles d'annuler mutuellement leurs effets. Pour Bergson, il n'y a rien à changer à la forme mathématique de la relativité, mais en vertu de la symétrie de leur situation il est certain *a priori* que les jumeaux se retrouveront au même âge. En quoi, bien entendu, il se fourvoie, car le résultat présenté par Langevin découle strictement de considérations mathématiques et n'a rien d'une hypothèse spéculative. Son entêtement a du moins le mérite d'obliger les physiciens à redoubler d'attention dans leurs exposés exotériques du paradoxe, et peut-être à clarifier pour eux-mêmes la véritable nature du phénomène. De quelle manière ? En évitant par exemple d'entretenir sous une même dénomination – le « ralentissement des horloges » – la confusion entre des effets strictement réciproques, comme la « dilatation » des temps propres (mesurés dans un référentiel en mouvement uniforme, à l'image du temps de désintégration des muons émis dans la haute atmosphère), et des effets non réciproques liés aux variations d'intensité des mouvements accélérés (cas des jumeaux). Le paradoxe, répétons-le, développe une intuition simple : le temps propre qui s'écoule entre deux événements donnés dépend, non pas du système de référence adopté pour coordonner les mesures, autrement dit de la perspective globale adoptée sur le mouvement, mais du chemin d'espace-temps le long duquel s'effectue localement la mesure. Ce chemin peut être un *raccourci* temporel. Et il jouera d'autant mieux ce rôle que le mouvement concret qui lui correspond sera intrinsèquement plus varié, moins uniforme. Langevin dit plaisamment qu'« il suffit de s'agiter, de subir des accélérations pour vieillir moins vite. » Cela ne signifie pas que les phases d'accélération agissent par elles-mêmes comme causes directes de certaines distorsions temporelles. Ce qui compte en vérité est l'allure d'ensemble conférée au mouvement par la variation : non pas l'accélération en tant que telle, mais la manière dont celle-ci contribue au déploiement spatio-temporel du processus, aux inflexions d'une « ligne d'univers » qui, en se traçant, relie de proche en proche une portion de matière à l'univers dans sa totalité. Après le « voyage en boulet de Langevin », il y eut donc les « jumeaux de Weyl », puis le « paradoxe de Painlevé ». Mais il aura fallu attendre Bergson et sa singulière obstination à ne pas vouloir trop vite *expliquer* la situation d'un point de vue physique, pour que cristallise véritablement le paradoxe des jumeaux tel que nous le connaissons. C'est d'ailleurs dans *Durée et simultanéité* que, pour la première fois, les deux jumeaux imaginés par Weyl sont identifiés par leurs noms propres, si facilement interchangeable : « Pierre »

et « Paul ». C'est à Bergson encore qu'on doit d'avoir popularisé l'expression même de « paradoxe des jumeaux » en en faisant un usage répété dans son livre, et en adoptant telle quelle la formulation simplifiée qu'en avait proposée Painlevé³⁰. Ainsi, en prenant simplement la peine de le nommer, et tout en en proposant une des plus vigoureuses critiques, Bergson aura contribué de façon décisive à installer durablement le paradoxe dans le paysage philosophique. Cette cristallisation n'aurait pas été possible sans le travail mené en amont par Langevin, préparant les esprits à la nouvelle théorie, essaimant articles et conférences dans les années qui suivent la conférence de Bologne, dialoguant sans relâche avec la communauté philosophique. Mais au bout du compte, ce paradoxe n'est pas plus le fait de Langevin que d'Einstein ou de quiconque ; on le doit aux efforts conjugués, sur une quinzaine d'années, d'une série de relais engagés dans un échange d'idées. Si l'on suit la genèse des choses, le paradoxe des jumeaux ne trouve sa formule stable qu'en 1922. Cette gloire différée est liée à la venue d'Einstein à Paris, à son dialogue de sourds très publicisé avec Bergson. Mais le retard lui-même s'explique tout autant par les circonstances exceptionnelles de la Grand Guerre et le coup d'arrêt donné pendant quelques années aux projets de collaboration intellectuelle au niveau européen³¹. Au-delà de ces raisons circonstanciées, on peut également imputer cette action retardée à la logique même du congrès international, à sa rhétorique propre et au mode de diffusion intellectuelle qu'il privilégie. Ce qui prime dans la conférence plénière, c'est l'effet de sidération lié à la formulation de thèses nouvelles ou audacieuses dont un auteur livre la primeur à un public qui les reçoit sans recul. Dans sa chronique du Congrès de Bologne, Abel Rey rappelle le mot de Benedetto Croce, invité à « répondre » au pied levé à l'exposé de Durkheim : « Il me faut le temps d'y réfléchir ». Bergson avait la même prudence : il lui aura fallu dix ans de réflexion pour formuler sa réponse à Langevin. Et comme on sait, c'est à Einstein lui-même qu'il l'adressera finalement, faute d'avoir pu engager un dialogue avec son relais français³².

³⁰ « Le mouvement du boulet peut être considéré comme rectiligne et uniforme dans chacun des deux trajets d'aller et de retour pris isolément » (*Durée et simultanéité*, *op. cit.*, p. 77, note). Jean Becquerel a recours à cette version idéalisée du paradoxe dans la critique qu'il adresse à Bergson, et qui se trouve reproduite dans l'appendice I de l'édition de 1923. Voir Jean Becquerel, « Critique de l'ouvrage *Durée et simultanéité* de M. Bergson », *Bulletin scientifique des étudiants de Paris*, 10 (2), 1923, p. 18-29.

³¹ Le Congrès de Londres, prévu en 1915, n'aura finalement pas lieu.

³² Le dialogue avec les scientifiques français n'eut lieu qu'*après-coup*, et avec d'autres (en particulier Jean Becquerel). Les dix ans de réflexion qui séparent le Congrès de Bologne de la

Il faut mentionner pour finir quelques raisons plus intrinsèques. Une théorie physique nouvelle est difficile à comprendre, non seulement parce qu'elle bouleverse certains cadres bien établis, mais parce que dans le cas de la relativité, le contexte théorique reste lui-même relativement opaque. À l'époque où Langevin présente sa théorie, la « relativité » recouvre encore plusieurs programmes concurrents. À côté de celle d'Einstein, que beaucoup – à commencer par Poincaré – considèrent surtout comme une commodité mathématique, il y a celle de Lorentz. Langevin lui-même accentue les choses à sa manière. Comme Poincaré, anticipant à cet égard la formulation de la relativité générale, il ne conçoit pas de cinématique séparée de la dynamique³³. D'où peut-être son insistance sur la place des accélérations, et de leurs effets inertiels associés, dans la description du voyage en boulet. Le paysage est donc passablement confus, et il ne faut pas trop s'étonner que jusqu'en 1922, en plein triomphe des idées einsteiniennes, Painlevé ou Bergson puissent encore s'interroger sur l'*interprétation* qu'il convient de donner aux formules de transformation de Lorentz ou à l'absence de mesure commune pour les temps propres associés à une pluralité de systèmes en mouvement. Les questions adressées à Langevin à la Société française de philosophie, en 1911, témoignent des difficultés liées à la compréhension même de la signification physique de la notion de « système de référence », tantôt simple instrument de repérage (une classe de systèmes de coordonnées équivalents), tantôt milieu physique clos assimilé à une portion de matière (et dont les occupants seraient réduits à n'enregistrer qu'un temps local). C'est dans ce contexte particulier qu'il convient de replacer ce que l'on conviendra d'appeler le « moment Langevin » de l'histoire du paradoxe des jumeaux.

Le moment Langevin

On l'a dit, l'exposé du Congrès de Bologne livre une version très conceptuelle de la relativité. Langevin insiste sur la refonte des notions d'espace et de temps, mais aussi sur la structure spatio-temporelle qui soutient la construction théorique d'Einstein, enfin sur

parution de *Durée et simultanéité* furent jalonnés pour Bergson par une quantité de lectures impressionnante (Einstein, Lorentz, Minkowski, mais aussi Schlick, Broad ou Whitehead), par des discussions informelles avec Le Roy et d'autres mathématiciens, et aussi par de nouveaux congrès, comme le Meeting d'Oxford de 1920 à laquelle il participe, et dont une session entière est spécialement consacrée aux enjeux philosophiques de la relativité.

³³ Voir Michel Paty, « Poincaré, Langevin et Einstein », *Épistémologiques*, 2 (1-2), 2002, p. 33-73.

le rôle crucial qu'y joue l'idée de causalité, à travers un principe de localité ou d'action locale dont la portée se marque négativement par le refus de l'action à distance, et positivement par la promotion de l'action de proche en proche (associée à l'idée de champ) à travers le postulat d'une vitesse-limite finie de propagation de l'énergie, véritable constante structurelle de l'espace-temps (la « vitesse de la lumière », notée c).

Les fameux effets relativistes sont présentés à travers ce prisme, à commencer par le plus connu : la relativité de la simultanéité. Cette relativité se comprend mieux, explique Langevin, lorsqu'on se rend compte que « le caractère absolu admis d'ordinaire pour la notion de simultanéité tient [...] à l'hypothèse implicite d'une causalité pouvant se propager avec une vitesse infinie, à l'hypothèse qu'un événement peut intervenir instantanément comme cause à toute distance³⁴. » Or « aucun événement ne peut agir instantanément comme cause à distance, [...] sa répercussion ne peut se faire sentir immédiatement que sur place, au point même où il a eu lieu, puis ultérieurement, à des distances croissantes et croissantes au maximum avec la vitesse de la lumière³⁵ ». La relativité de la simultanéité ne concerne donc que des événements *indépendants*, qu'aucun lien de causalité n'est en mesure de connecter l'un à l'autre : des événements tels que « leur distance dans l'espace est [toujours] supérieure au chemin parcouru par la lumière pendant l'intervalle de temps qui les sépare³⁶ ». De tels événements peuvent être vus comme simultanés sous une certaine perspective spatio-temporelle (fonction du choix d'un certain système de référence), et comme non simultanés sous une autre. Mais cette indétermination (ou surdétermination) temporelle ne peut jamais concerner des événements qui entretiennent – ou pourraient entretenir – l'un avec l'autre une relation *réelle*, c'est-à-dire *causale*.

C'est sous ce point de vue que Langevin introduit la notion de « temps propre » évoquée plus haut. Le moindre vieillissement du voyageur atteste la différence des temps propres écoulés, pour deux observateurs, entre deux événements communs de leurs histoires respectives (leur séparation, suivie de leur réunion). Et cette différence, comme on l'a vu, est *absolue* : non pas attribuée seulement sous une perspective particulière, mais constatée par la confrontation empirique des horloges ou des corps inégalement affectés par le

³⁴ Paul Langevin, « L'évolution de l'espace et du temps », *art. cit.*, p. 460.

³⁵ *Ibid.*, p. 462.

³⁶ *Ibid.*, p. 464.

passage des heures. Elle marque l'impossibilité de définir, dans l'espace-temps de la relativité, une fonction temporelle universelle, une relation d'ordre globale entre les instants du devenir. Qu'il n'y ait pas moyen de fixer de manière univoque les relations de simultanéité entre événements distants trouve là son explication ultime. La relativité de la simultanéité n'est pas un artefact lié au choix conventionnel de certaines opérations de mesures ; elle est une manifestation de la structure causale de l'espace-temps qui sous-tend le concept réduit du temps. De même, les temps désaccordés des futurs jumeaux doivent se comprendre à partir des caractères objectifs, c'est-à-dire invariants ou intrinsèques, des phénomènes (invariants métriques, invariants topologiques, etc.). D'où la place accordée par Langevin à la présentation géométrique de la théorie, et sa prédilection pour la formalisation de Minkowski en termes d'espace-temps à signature pseudo-euclidienne – format théorique qu'Einstein lui-même, à l'époque, n'utilisait que parcimonieusement. Avec cette conséquence épistémologique remarquable : ce que la relativité présente comme « relatif » (les relations de simultanéité à distance, les durées associées à des systèmes de référence en mouvement uniforme) doit être compris comme physiquement *indifférent*. Le geste de relativisation ne fait que manifester les symétries que présente la structure profonde d'une théorie dont Einstein expliquait à Sommerfeld qu'elle serait plus adéquatement désignée comme « théorie des invariants ». C'est d'ailleurs ce trait que Bergson choisira de mettre en avant – tout en prévenant le lecteur contre la tentation d'accorder trop vite une portée ontologique aux invariants mathématiques –, dans une longue note de *La Pensée et le mouvant* qui se clôt sur le commentaire d'une citation de Langevin³⁷.

Le propos de Langevin traduit enfin un ordre de préoccupation très sensible en 1911. Rey a dit du Congrès de Bologne qu'il avait été le « Congrès du pragmatisme », et cela se marque dans le souci de nombre de conférenciers de souligner la fonction instrumentale de la science dans la connaissance du réel. La conférence de Langevin ne déroge pas à la règle. Sans contredire son réalisme foncier, elle s'ouvre sur des considérations historiques ou génétiques concernant l'évolution des concepts d'espace et de temps depuis Newton. Ces considérations lui fournissent son titre : « L'évolution de l'espace et du temps ». Le thème évolutionniste s'oppose ici à un certain usage de *l'a priori*. Espace et temps ne sont pas des formes *a priori* ; à chaque degré de développement de notre conception du monde

³⁷ Henri Bergson, *La Pensée et le mouvant*, *op. cit.*, p. 39.

physique correspond une conception particulière de l'espace et du temps. On est ainsi passé de la mécanique rationnelle à la relativité, qui est une synthèse de la mécanique et de l'électromagnétisme, au prix d'une réforme profonde de nos cadres de pensée. Mais cette refonte théorique n'a rien de spéculatif ; elle est elle-même constamment ajustée aux faits expérimentaux. Rey insiste, en des termes qui ont une sonorité étrangement bergsonienne, sur le fait que cette « adaptation aux faits des catégories les plus fondamentales » fournit l'occasion de « pénétrer la nature intime de ces catégories en les trouvant encore en voie d'évolution, en les voyant vivre et se transformer sous ses yeux³⁸ ».

Rétrospectivement, tout se passe pourtant comme si cette dimension épistémologique du propos avait été éclipsée à Bologne par l'effet de sidération produit sur les esprits par la formulation pourtant embryonnaire du fameux paradoxe. Langevin eut l'occasion de s'en rendre compte lors du débat à la Société française de philosophie qui suivit de quelques mois le Congrès. Les participants, Brunschvicg et Le Roy en tête, veulent comprendre de quelle manière le temps réduit du physicien se raccorde aux attentes qui sous-tendent habituellement le concept de temps. Langevin a beau leur expliquer qu'il ne s'agit pas de « refaire l'unité du temps³⁹ » sur la base des « temps propres », il voit bien que l'articulation entre le temps vécu des consciences et celui des horloges matérielles, articulation qu'il a lui-même placée en pleine lumière avec son « voyage en boulet », est à la fois nécessaire et immédiatement problématique. N'est-il pas évident « que les conséquences auxquelles nous aboutissons pour la mesure physique du temps doivent s'étendre à toute la conception commune du temps » ? Brunschvicg a beau jeu de rétorquer : « vous ne substituez pas à la notion commune des temps la notion nouvelle du temps propre, vous les gardez toutes les deux⁴⁰ ». Les temps des jumeaux n'ont pas de mesure commune tant qu'ils sont séparés, mais nous ne pouvons nous empêcher de les penser ensemble, réunis dans le temps par un fil ténu ou une matrice invisible. Reformulant le paradoxe au risque d'en fausser le sens, Bergson n'aura de cesse, pour sa part, de revenir à la question de la coexistence des temps – temps de la matière et temps des consciences, mais aussi temps des consciences entre elles. Ce sont les modalités de

³⁸ Abel Rey, « Le congrès international de philosophie », *art. cit.*, p. 17.

³⁹ « Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne », cité dans le dossier critique de *Durée et simultanéité*, *op. cit.*, p. 381.

⁴⁰ *Ibid.*, p. 380-381.

cette coexistence que la théorie d'Einstein oblige à penser à nouveaux frais dans un univers où la seule notion objective de simultanéité dont nous disposions semble être celle de la coïncidence locale de deux événements dans l'espace et le temps : ici-maintenant. En quel sens Paul, séparé de Pierre, est-il néanmoins *contemporain* de lui ? Voilà sans doute la véritable énigme léguée par Langevin aux philosophes.

Elie During

Université de Paris Ouest Nanterre La Défense