

PHILOSOPHIA SCIENTIÆ

VINCENT BORELLA

A propos du paradoxe de Langevin

Philosophia Scientiæ, tome 1, n° 1 (1996), p. 63-82

http://www.numdam.org/item?id=PHSC_1996__1_1_63_0

© Éditions Kimé, 1996, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Philosophia Scientiæ* » (<http://poincare.univ-nancy2.fr/PhilosophiaScientiae/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

A propos du paradoxe de Langevin

Vincent Borella

ACERHP

Résumé. – En formulant son célèbre paradoxe, Langevin s'est toujours volontairement placé dans le cadre strict de la relativité restreinte. Néanmoins, pour justifier la dissymétrie des deux référentiels, il doit faire intervenir l'accélération de l'un d'eux, ce faisant, au point crucial de son raisonnement, Langevin est contraint de quitter le cadre de la relativité restreinte. Ce fait est connu mais ses conséquences n'ont jamais été complètement explorées. Cet article se propose de montrer comment cette équivoque est à l'origine des erreurs de Bergson qui, par ailleurs, développe un raisonnement pertinent, si l'on admet qu'il respecte les conditions initiales imposées par Langevin. Mais cette équivoque est aussi à l'origine de la pluralité des interprétations données à ce paradoxe par les physiciens eux-mêmes, bien qu'ils soient d'accord sur sa formulation mathématique. Ainsi l'expérience de pensée proposée par Langevin étant mauvaise car irréalisable, non pas techniquement mais par principe, perd-elle à la fois ses vertus pédagogiques et son éventuelle valeur heuristique.

1. Comment se pose le problème

Le paradoxe dit «de Langevin» est peut-être le plus célèbre des paradoxes de la physique moderne. Il est parfois dénommé «le voyageur de Langevin», ou «paradoxe des jumeaux», ou «le boulet de Langevin», ou encore «le paradoxe des horloges» et même le «twin paradox».

C'est un paradoxe qui a toujours été exprimé dans le cadre de la relativité restreinte bien qu'il ne puisse trouver de solution physiquement satisfaisante que dans le cadre de la relativité généralisée.

Ce paradoxe a donné lieu à une abondante littérature que l'on peut diviser en trois périodes.

Première période : l'énoncé initial du paradoxe par Langevin au congrès de philosophie de Bologne en 1911 ; il s'agit pour Langevin de décrire une expérience imaginaire destinée à frapper les esprits dans un but clairement pédagogique : Langevin veut contraindre son auditoire à abandonner ses habitudes de pensée, ses représentations quant à sa conception du temps, afin de lui permettre de comprendre vraiment la nouvelle conception relativiste du temps. Dans ce cas le paradoxe de Langevin n'est paradoxal que dans le sens faible du terme ; il s'agit d'une proposition heurtant le bon sens, paraissant invraisemblable, mais en aucun cas contradictoire.

Deuxième période : Paul Painlevé fait remarquer la nature physiquement paradoxale de l'expérience imaginaire de Langevin, à l'occasion de la visite d'Einstein en France, en 1922. Cette objection

de Painlevé change radicalement le statut de l'expérience de Langevin qui, de moyen pédagogique, devient un point d'achoppement grave pour la théorie de la relativité elle-même. De simple outil pédagogique le paradoxe de Langevin est devenu objet de débat et de démonstration mathématique. L'enjeu n'est pas anecdotique, il en va de la cohérence interne de la théorie. Dès lors le paradoxe acquiert sa forme forte puisque l'objection de Painlevé aboutit à une contradiction logique (chacun des protagonistes de l'expérience de Langevin voit l'autre plus jeune que lui). Cette même année 1922, Henri Bergson entre dans le débat par la publication de son livre *Durée et simultanéité* ; il en sera impitoyablement chassé pour incompetence par la communauté des physiciens et des vulgarisateurs scientifiques. Pourtant, Bergson, en proposant indirectement une solution à la contradiction relevée par Painlevé, évitait au paradoxe de manifester son aspect paradoxal le plus pernicieux, celui qu'il acquiert lorsqu'il entre en contradiction avec le postulat fondamental de la relativité interdisant à une expérience physique quelconque de déterminer si le système de référence choisi est en repos ou en mouvement. Or le dilemme est simple : soit le sédentaire et le voyageur de l'expérience de Langevin se voient respectivement plus jeune l'un que l'autre et il y a contradiction dans cette conclusion, soit le voyageur est bien plus jeune que le sédentaire et alors il existe un moyen physique de distinguer un référentiel en mouvement rectiligne uniforme d'un référentiel au repos et cette conclusion est en contradiction avec le principe même de la relativité.

Troisième période : de nos jours, ce paradoxe est considéré comme parfaitement résolu dans sa formulation mathématique, il n'est plus regardé que comme un exercice d'école¹. Pourtant, la communauté des physiciens n'est pas d'accord sur une interprétation univoque de cette expérience de pensée : en particulier du fait de la nature paradoxale au sens fort du terme de cette expérience, il y a là un conflit entre la solution mathématiquement cohérente de cette expérience et son interprétation physiquement équivoque qui mérite que l'on s'y attarde. Quant à Bergson il est aujourd'hui unanimement admis qu'il avait physiquement tort et pourtant un examen attentif de sa démonstration montre qu'il avait raison à condition de rester strictement dans le cadre de l'expérience imaginée par Langevin. Il y a là un nouveau conflit entre le fait que ce qu'affirme Bergson n'est pas conforme avec la théorie de la relativité et le fait que ces affirmations puissent être néanmoins rigoureusement déduites de l'expérience de Langevin. Ces deux conflits obligent à remettre en cause le bien fondé de cette expérience elle-même.

Il apparaît clairement que le paradoxe de Langevin aboutit à ces deux types de conclusions conflictuelles et contradictoires dès

qu'il quitte son statut d'outil pédagogique destiné à briser les représentations mentales les plus profondément ancrées, autrement dit, dès qu'il n'est plus considéré comme un paradoxe au sens faible du terme, au sens d'une affirmation heurtant le bon sens. Si la situation imaginée par Langevin est considérée comme une expérience de pensée ayant une valeur ne serait-ce que simplement vulgarisatrice et *a fortiori* heuristique, elle devient alors non seulement paradoxale au sens fort du terme mais surtout inopérante. En effet, il ne s'agit pas simplement d'une expérience imaginaire techniquement irréalisable mais bien d'une expérience irréalisable par principe. Le malheur de Bergson est d'avoir pris cette expérience au sérieux et d'avoir développé son raisonnement à partir des conditions imposées par cette expérience. Mais comment reprocher à Bergson ses conclusions erronées, quand certains physiciens prennent eux-mêmes cette expérience au sérieux, en démontrant qu'elle n'aboutit pas à des résultats contradictoires et qu'elle n'entre pas non plus en contradiction avec la théorie de la relativité restreinte ? C'est ce que nous voudrions montrer en analysant les trois périodes de l'histoire du paradoxe de Langevin.

2. 1911, première formulation par Langevin, un outil pédagogique

En 1911, au congrès de philosophie de Bologne, Paul Langevin prononce une conférence intitulée : «L'évolution de l'espace et du temps». Le texte de cette intervention est publié dès 1911 dans la revue *Scientia*², il sera repris sans changement dans l'ouvrage *La physique depuis vingt ans*³, publié par Langevin en 1923.

Cette conférence, qui est le premier exposé en langue française de la théorie de la relativité restreinte, contient également, à titre d'exemple destiné à bousculer les habitudes de pensée de son auditoire, le récit d'une expérience imaginaire qui deviendra le paradoxe de Langevin.

Langevin imagine deux hommes : l'un reste sur Terre, le second est propulsé dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière par un canon à la Jules Verne. Après un an de voyage, le boulet, profitant de l'action gravitationnelle d'une étoile, revient vers la Terre. Au retour, la Terre a vécu deux siècles et le voyageur deux ans.

Par cet exemple, Langevin veut faire comprendre que la dilatation du temps dans un référentiel en mouvement, relativement à un référentiel d'origine considéré au repos, est une réalité physique, le temps biologique, le temps vécu, lui aussi ralentit, d'où le moindre vieillissement du voyageur par rapport au sédentaire.

Ainsi exposée, l'expérience de Langevin n'est paradoxale qu'au sens faible du terme. Il s'agit d'admettre une réalité heurtant le bon sens : le temps coule moins vite dans un référentiel en mouvement relatif, l'esprit peut se refuser à l'accepter mais il ne peut, pour se faire, arguer d'une contradiction logique dans le raisonnement ainsi exposé, il ne peut opposer à cette affirmation que le poids des habitudes de pensées.

Il est d'ailleurs aisé de démontrer rigoureusement le moindre vieillissement du voyageur à l'aide d'un diagramme de Minkowski faisant clairement apparaître que la ligne d'espace-temps du voyageur est plus courte que celle du sédentaire.

Mais en relativité, par définition, il n'est pas possible de distinguer entre deux référentiels en mouvement relatif rectiligne et uniforme. Il n'y a plus ni mouvement absolu, ni repos absolu, mouvement et repos ne sont que relatifs. Il en résulte que si le temps du voyageur ralentit relativement à la Terre, de même le temps de la Terre ralentit relativement au voyageur. On aboutit alors à cette conclusion totalement paradoxale, au sens où elle est contradictoire et absurde, selon laquelle, lors du retour, le sédentaire retrouve le voyageur plus jeune que lui, tandis que le voyageur retrouve le sédentaire plus jeune que lui.

En 1911, Langevin ne se heurte pas à cette contradiction qu'il n'expose d'ailleurs pas car il postule d'emblée qu'il y a dissymétrie des situations physiques du voyageur et du sédentaire. Mais en mettant en avant cette dissymétrie Langevin admet implicitement que son expérience ne relève pas de la relativité restreinte, or, d'autre part, il ne peut pas l'admettre explicitement puisqu'il a précisément imaginé cette expérience pour faire comprendre un des aspects de la relativité restreinte. Même en 1922, alors que la relativité généralisée aurait offert à Langevin un cadre beaucoup plus adéquat pour résoudre le paradoxe de son expérience imaginaire, Langevin continuera de n'envisager de solution que dans le cadre de la relativité restreinte. Il y a là une équivoque fondamentale qui induira en erreur ceux qui comme Bergson utiliseront cette expérience mentale comme point de départ de leurs réflexions.

Pour l'heure, en 1911, Langevin justifie la dissymétrie des deux systèmes de références de façon un peu déroutante pour des non-scientifiques puisqu'au lieu d'aborder directement le problème crucial des accélérations subies par le voyageur, il commence par changer de point de vue en examinant comment, à l'aide de signaux lumineux, le sédentaire peut avoir des nouvelles du voyageur et réciproquement. Il doit alors utiliser, mais il ne le précise pas, l'effet Doppler-Fizeau selon lequel il y a une modification apparente de la fréquence d'une onde monochromatique lorsque la source qui l'émet

ou le récepteur qui la reçoit sont en mouvement, la radiation est déplacée vers les grandes longueurs d'ondes si la source s'éloigne et vers les courtes longueurs d'ondes si elle se rapproche. Langevin peut alors expliquer que pendant le voyage aller chacun voit l'autre vivre 200 fois plus lentement qu'à l'ordinaire, il y a donc dilatation relative et réciproque du temps, puis il poursuit en écrivant que lors du retour chacun voit vivre l'autre d'une vie 200 fois accélérée : il y a toujours réciprocity. Pour résoudre le problème de la dissymétrie, Langevin écrit alors :

«Ainsi la dissymétrie tient 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, ce qui fait que le voyageur voit la Terre s'éloigner et se rapprocher de lui pendant des temps égaux chacun pour lui à un an, tandis que la Terre prévenue de cette accélération seulement par l'arrivée d'ondes lumineuses, voit le voyageur s'éloigner d'elle pendant deux siècles et revenir pendant deux jours». [Langevin 1923, p. 296-297]

Là encore le raisonnement est physiquement parfaitement légitime, sa validité peut à nouveau être démontrée à l'aide d'un diagramme de Minkowski faisant figurer les signaux lumineux transmettant le rythme de l'horloge du sédentaire vers le voyageur et celle du voyageur vers le sédentaire. Chacun constate alors que l'autre vieillit moins rapidement que lui et cela dans les mêmes proportions lors du voyage aller, puis, lors du retour, chacun constate que l'autre vieillit plus vite que lui. Mais ce changement de jugement, bien que toujours réciproque, n'a pas lieu au même moment. Le sédentaire constate que le voyageur vieillit plus que lui alors que le voyageur a déjà accompli bien plus que la moitié de son voyage ; ainsi le sédentaire constate-t-il au total un vieillissement moins grand du voyageur.

Pourtant l'argumentation de Langevin n'est pas totalement satisfaisante. Tout d'abord Langevin fait intervenir au coeur de son raisonnement la notion d'accélération afin de justifier la dissymétrie des deux systèmes de références ; mais l'accélération dont il parle n'est pas celle qui est ressentie par le voyageur mais celle qui est perçue par le sédentaire avec un temps de retard, ce qui n'est pas du tout la même chose ; car autant l'accélération ressentie par le voyageur – non seulement lors du demi-tour mais encore lors du départ et de l'arrivée – rend sa situation non réciproque de celle du sédentaire, autant la perception du changement du sens de la vitesse par le sédentaire peut être appliquée au voyageur, si on décide de l'immobiliser et de mettre en mouvement le sédentaire. Autrement dit, Langevin prétend conserver à l'accélération, comme il le dit lui-même, «un sens absolu», alors que, dans sa démonstration, elle n'a

plus qu'un sens relatif et donc transposable d'un référentiel à l'autre. Ainsi Langevin donne à l'accélération un statut physique qui lui est indispensable pour expliquer que la situation physique du voyageur ne soit pas symétrique de celle du sédentaire, il n'a d'ailleurs aucun mal à le faire car le bon sens exige que se soit le voyageur qui ait fait demi-tour et non la Terre, pourtant la démonstration mathématique qui sous-tend son raisonnement n'accorde pas ce statut particulier à l'accélération, cette démonstration est, elle, parfaitement réversible, il suffit pour cela d'en inverser les termes. S'il n'en était pas ainsi il faudrait admettre que la Terre est au repos absolu et que le boulet est en mouvement absolu. Langevin est pris dans cette contradiction car son expérience doit montrer quelque chose dans le cadre de la relativité restreinte alors qu'elle n'en relève pas.

D'autre part Langevin commet en quelque sorte une erreur pédagogique. En effet, dans un premier temps, il compare les temps relatifs du sédentaire et du voyageur et, dans un deuxième temps, afin de montrer que les situations ne sont pas symétriques, il fait intervenir des signaux lumineux au moyen desquels les temps relatifs sont respectivement connus, ce faisant il déplace le problème et introduit une certaine confusion. Il est très probable que cette façon d'expliquer la dissymétrie entre les temps relatifs par les temps respectivement perçus est à l'origine de la réflexion erronée de Bergson, en particulier lorsqu'il compare la dilatation du temps relatif à un effet de perspective. En effet, le raisonnement de Langevin encourage le non-scientifique à admettre que le temps d'un référentiel en mouvement relatif uniforme est ralenti ou accéléré, par rapport à son temps propre, suivant le sens de la vitesse de ce référentiel. Or, il s'agit d'un simple effet Doppler. La relativité, elle, affirme, comme l'écrit Langevin lui-même, que «l'intervalle de temps entre deux événements qui coïncident dans l'espace et qui se succèdent en un même point pour un système de référence est moindre pour celui-ci que pour tout autre en translation uniforme quelconque par rapport au premier» ; ou encore de façon plus succincte, Langevin écrit en substance que pour un morceau de matière quelconque, entre deux événements, l'intervalle sera la plus court pour tout observateur lié à cette portion de matière⁴, en d'autres termes, mon temps propre est le plus court possible.

S'il était indispensable d'introduire la notion de perception des temps relatifs, il aurait été moins équivoque d'imaginer que chacun des protagonistes avait le moyen d'observer directement le temps de l'autre à l'aide d'un télescope lui permettant de lire l'heure sur l'horloge de l'autre, la couleur des horloges auraient alors été décalée vers le rouge lors de l'aller puis vers le violet lors du retour, mais durant tout le voyage chacun aurait pu constater à l'aller comme au retour que l'horloge de l'autre ralentissait par rapport à la sienne.

La *Revue générale des sciences* publie, dans sa livraison du 15 mars 1914, un article de H. A. Lorentz, intitulé «Considérations élémentaires sur le principe de relativité»⁵. En conclusion de son article Lorentz reprend, sans citer Langevin, l'exemple du voyageur. Il résoud alors le problème de la dissymétrie des situations de la même façon que Langevin bien que son explication fasse plus directement appel à une formulation mathématique. Ainsi, il apparaît que, dès l'avant-guerre, le paradoxe de Langevin est devenu un lieu commun des discours de vulgarisation sur la relativité restreinte.

3. 1922, Painlevé souligne le paradoxe

Lors de la séance du 3 avril 1922 au Collège de France, en présence d'Einstein et de personnalités françaises du monde scientifique, au premier rang desquelles Paul Langevin à qui revient l'initiative de l'invitation du prix Nobel allemand, Paul Painlevé soumet à l'assemblée une expérience imaginaire analogue à celle imaginée par Langevin 11 ans plus tôt. Il faut remarquer que nulle part il n'est fait référence à un quelconque paradoxe de Langevin.

Dans le cas de figure imaginé par Painlevé, il s'agit d'un train qui traverse une gare à grande vitesse, lors du passage devant l'horloge de la gare, le chef de train règle sa montre sur cette horloge. Puis le train fait demi-tour et revient vers la gare. En tenant compte de la vitesse du train et de la distance parcourue, on peut alors calculer le retard de la montre du chef de train par rapport à l'horloge du chef de gare. «Ce qui paraît choquant, insolite, à M. Painlevé dans ces conséquences», écrit Charles Nordmann dans la *Revue des deux mondes*, «ce n'est pas ce qui en elles heurte le sens commun ; ce n'est pas ces hommes dont les uns vieillissent réellement beaucoup moins vite que d'autres, simplement parce que ceux-là ont voyagé [...]. Non [...], ce qui choque M. Painlevé [...], c'est autre chose [...]. Si l'observateur A voit les mètres et l'horloge que porte l'observateur B respectivement raccourcis et ralenti par sa vitesse, de même l'observateur B verra les mètres et horloge portés par A raccourcis et ralenti dans les mêmes proportions [...]. La réciprocité qu'implique le principe de relativité ne devrait-elle pas exiger [...] que le chef de train voie l'horloge de la gare en retard sur la sienne ? D'ailleurs, si tel était le cas, on se trouverait en présence d'une absurdité, d'une impossibilité, car il est contraire au bon sens que si deux hommes voient au même instant et au même lieu où ils se trouvent deux horloges H1 et H2, l'un puisse voir H1 en avance sur H2 et l'autre H2 en avance sur H1» [Nordmann 1922, p. 147-148]. Voilà le premier exposé explicite du paradoxe de Langevin sous sa forme forte. *La Nature*, sous la plume de Max Morand⁶, en donne un compte rendu similaire.

A propos du paradoxe de Langevin

La question est grave, elle est de nature à remettre en cause la cohérence interne de la théorie de la relativité. Tous les comptes-rendus montrent qu'Einstein ne se laisse absolument pas ébranler par le problème soulevé par Painlevé. Max Morand écrit qu'«Einstein répond qu'on peut très facilement résoudre la difficulté de deux façons» [Morand 1922, p. 316]. Puis il rapporte les arguments d'Einstein montrant que le train à l'aller et au retour représente non pas un mais deux systèmes de références, il ne peut donc y avoir réciprocité entre un système qui a changé une fois de direction et l'autre pas. D'autre part, pendant la période de changement de vitesse le train n'est plus un référentiel d'inertie, sous-entendu - mais Einstein ne le dit pas explicitement - le problème ne relève plus de la relativité restreinte. Il est intéressant de noter avec quelle aisance Einstein va au coeur du problème, à l'endroit précis où se noue le paradoxe. Sa réponse contient les deux solutions possibles à ce paradoxe, soit il relève de la relativité généralisée et dans ce cas l'accélération explique la dissymétrie des situations, soit il relève de la relativité restreinte et dans ce cas il est possible de négliger les accélérations mais il faut alors envisager la présence de trois et non pas deux référentiels distincts. Il est remarquable que par la suite de nombreux vulgarisateurs reprendront cette explication des trois référentiels car elle permet justement de rester dans le cadre de la relativité restreinte.

Pourtant, à y regarder de plus près, cette explication apparaît bien comme un subterfuge. En effet, si l'on admet qu'il y a bien trois référentiels et non deux, c'est parce qu'il y a eu changement de direction, or si ce changement de direction ne peut-être appliqué qu'au voyageur et en aucun cas au sédentaire, c'est qu'on lui accorde un caractère absolu et non pas relatif ; mais qu'est ce qu'un changement de direction si ce n'est un changement du sens de la vitesse et qu'est ce qu'un changement du sens de la vitesse si ce n'est une accélération ? Autrement dit, en introduisant la notion de troisième référentiel, on réintroduit par effraction la notion d'accélération non réciproque de l'un des deux référentiels d'origine, et ainsi à nouveau, sans le dire explicitement, on admet implicitement que l'expérience ne relève pas de la relativité restreinte.

Quoiqu'il en soit la réponse d'Einstein n'a pas clos le débat puisque finalement Painlevé et Einstein se mettent d'accord pour confier à Langevin le soin d'apporter à la séance suivante la solution du problème.

Langevin exposera sa réponse lors de la séance du 5 avril 1922. Jusqu'à présent la teneur exacte de la démonstration de Langevin semblait perdue, il n'en restait que des allusions. Or nous avons pu

retrouver l'exposé exact de Langevin, soigneusement consigné par Max Morand pour la revue *La nature*⁷, Max Morand doit à sa qualité d'élève de l'École Normale Supérieure d'avoir pu assister à une séance qui n'était pas ouverte au public.

Langevin souligne d'entrée «que les objections soulevées ne peuvent porter que sur la signification physique et non sur la cohésion mathématique de la théorie» [Morand 1922, p. 316]. Signifiant par là l'enjeu de sa démonstration, car une théorie physique mathématiquement cohérente ne présente aucun intérêt si elle ne rend pas compte de la réalité physique.

Vient alors une longue démonstration décrivant pas à pas ce qui se passe à chaque étape du voyage. Pour plus de commodité, Langevin imagine que la voie est bordée d'horloges devant lesquelles passe successivement le chef de train, tandis que le train immensément long possède une multitude de montres qui passent successivement devant la gare. En appliquant les transformations de Lorentz, Langevin peut alors convertir le temps du train en temps de la gare et réciproquement, à chaque instant du voyage. La clé de son raisonnement est le moment où le train change brusquement de direction pour revenir vers la gare. Alors, sous l'effet de l'accélération, toutes les montres du train se trouvent dérégées, il faut les synchroniser à nouveau sur celle du chef de train qui elle ne doit pas être touchée, car elle est la montre de référence pour le train. Il en résulte que le chef de gare et le chef de train ont vu se passer devant eux les mêmes phénomènes, il y a réciprocity durant le voyage. Mais, lorsque le chef de train repasse devant la gare, sa montre retarde par rapport à celle du chef de gare. Le chef de gare fait la même constatation, l'horloge de la gare est bien en avance sur la montre du chef de train. Ainsi le paradoxe disparaît, tout en conservant la réciprocity entre le référentiel gare et le référentiel train.

Il est clair que dans sa démonstration Langevin se heurte à la même difficulté qu'en 1911 en voulant conserver pour cadre de son expérience deux référentiels en mouvement relatif rectiligne et uniforme, tout en faisant subir à l'un des deux un phénomène physique qui ne peut avoir de réciproque dans l'autre référentiel. Bien sûr, il simplifie le problème puisque le train ne fait que passer devant la gare et ne subit plus qu'une seule accélération lors du changement de direction, mais il n'en demeure pas moins que ce changement de direction fait perdre au référentiel train sa qualité de référentiel d'inertie, ce qui interdit de résoudre la question dans le cadre de la relativité restreinte, sauf à admettre que le mouvement du train n'est pas relatif mais absolu, ce qui est en contradiction avec le postulat relativiste lui-même.

4. 1922, Bergson entre dans le débat

En 1922, H. Bergson publie son ouvrage si critiqué : *Durée et simultanéité, à propos de la théorie d'Einstein*⁸. A l'évidence, ce livre est construit autour d'une réflexion sur le paradoxe de Langevin et d'un approfondissement de ses conséquences philosophiques.

Bergson affirme, en substance, qu'il n'y a pas de paradoxe car le point de vue du voyageur est symétrique de celui du sédentaire, chacun voit l'autre moins vieillir que lui, mais il s'agit d'une sorte d'effet de perspective temporelle, et, au retour, tous les deux auront vécu la même durée et auront donc le même âge.

Une fois cette conclusion admise Bergson peut en tirer des conséquences sur la nature du temps, ce qui constitue le coeur de sa démonstration. Il y a réciprocité, affirme Bergson, entre les deux systèmes de référence S et S'. Donc, quand un observateur dans S mesure un temps ralenti dans S', de quel temps s'agit-il ? Il ne s'agit pas du temps vécu dans S, évidemment ; il ne s'agit pas non plus du temps vécu dans S', puisque les deux systèmes sont équivalents et ont donc le même temps. S'agit-il alors du temps que S imagine vécu par S' ? Là encore non, car lorsque l'observateur de S fait cette imagination, il se transporte par l'esprit dans S' et c'est le temps de S qui devient ralenti. Cette analyse permet à Bergson d'affirmer que le temps relatif n'est que du «néant dilaté», qu'il n'existe qu'un seul temps réel, c'est le temps réellement vécu. Ce qui ramène le philosophe à son thème central de la durée, que la théorie de la relativité permet de prouver, selon lui, alors qu'auparavant, on ne pouvait en avoir que l'intuition.

L'ensemble de cette démonstration sera condamné sans appel par des scientifiques comme Becquerel ou Einstein qui tenteront de démontrer à Bergson ses erreurs, condamné aussi par des vulgarisateurs comme André Metz⁹, condamné enfin plus tard par des philosophes comme Hervé Barreau qui publie en 1973 un long article dans les *Etudes bergsonniennes* destiné à mettre un point final à la discussion¹⁰.

Pourtant, en 1971, dans sa remarquable *Histoire du principe de relativité*, M. A. Tonnelat fait remarquer dans son chapitre intitulé «Relativité restreinte et philosophie» que la conclusion de Bergson concernant l'âge respectif du voyageur et du sédentaire est correcte «car des phénomènes identiques rapportés à leur système propre sont indifférents aux mouvements rectiligne et uniforme de ce système. Si Langevin obtient des conclusions différentes, c'est évidemment en postulant que les situations physiques ne sont pas symétriques l'une de l'autre». Elle ajoute :

«Pourtant, et c'est l'excuse de Bergson, les conclusions de Langevin

supposent uniquement l'application des formules de Lorentz, en négligeant les temps d'accélération». [Tonnelat 1971, p. 284-285]

Il faut souligner cette honnêteté intellectuelle vis à vis du travail de Bergson qui est, semble-t-il, unique dans la littérature concernant cette controverse. Pourtant, dans un autre chapitre, intitulé «Les apparents paradoxes de la relativité restreinte»¹¹, Tonnelat traite du paradoxe de Langevin comme d'un paradoxe seulement apparent, dont la solution est mathématiquement simple, bien qu'il donne lieu à plusieurs interprétations physiques. En d'autres termes, il est remarquable que l'équivoque fondamentale du paradoxe de Langevin soit mise en avant à la décharge de Bergson et minimisée lorsque ce paradoxe est traité par les physiciens.

De façon plus symptomatique encore Guy Poncelet peut écrire dans son article intitulé *Considérations épistémologiques sur la théorie de la relativité*, publié en 1972 :

«Si $T = T' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$; mais également $T' = T \sqrt{1 - v^2 / c^2}$
Cependant que $L = L' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ exploitant la Relativité, va plus loin et affirme : $D = D' \sqrt{1 - v^2 / c^2}$; mais pas inversement, sinon il serait loisible à tel homme de dire qu'il a vécu aussi bien 50 ans que 50000, suivant le système de référence considéré au repos.»
[Poncelet 1972, p. 27]

Ici T représente le temps et D la durée. Or une telle affirmation n'a strictement aucun sens. Comparée à une telle assertion, on mesure combien le raisonnement de Bergson avait de pertinence et de rigueur.

En fait, quelles sont les erreurs de Bergson ? Il y en a deux. La première est qu'il compare les effets relativistes sur le temps à un simple effet de perspective temporelle ; nous avons montré que cette erreur trouvait très probablement sa racine dans l'explication de Langevin lui-même, lorsqu'en 1911 il fait intervenir, sans le dire, l'effet Doppler-Fizeau. La seconde erreur de Bergson est de ne pas accorder de réalité physique au temps relatif, de ne voir dans ce temps que du «néant dilaté». Il faut souligner à ce propos que Bergson a été desservi par le seul commentateur qui lui ait été favorable, le prix Nobel de physique Edouard Guillaume, lequel publia en 1922 dans la *Revue générale des sciences* un article intitulé «La question du temps d'après M. Bergson»¹². Or, dans cet article, Guillaume affirme clairement que ce qui donne raison à Bergson est l'absence d'effet physique constatable expérimentalement de la dilatation du temps relatif. Une telle affirmation n'est évidemment plus acceptable aujourd'hui où les effets physiques de la dilatation du temps sont communément utilisés. Particulièrement en physique des particules, lorsque des particules à durée de vie très courte peuvent

A propos du paradoxe de Langevin

néanmoins être observées par allongement relatif de cette durée de vie par effet relativiste.

De tels arguments discréditent évidemment le raisonnement de Bergson. Mais si, comme Bergson, on accepte de se placer vraiment dans le seul cadre de la relativité restreinte – sans tricher en faisant intervenir au moment opportun une accélération permettant d'introduire dans le système une dissymétrie bien commode – on est alors obligé de conclure avec Bergson que ce temps dilaté est bien un temps relatif, c'est à dire qu'il est dilaté relativement au temps propre de l'observateur, et donc que les temps propres restent identiques. Ainsi le seul élément à ajouter à la démonstration de Bergson est que le temps relatif a une réalité physique aussi grande que le temps propre.

Une expérience de pensée très simple peut être imaginée pour mieux faire comprendre, par analogie, le raisonnement de Bergson ainsi que les limites de ce raisonnement. Dans cette expérience, le temps propre et le temps relatif sont remplacés par les trajectoires d'une balle lâchée verticalement. Imaginons un voyageur dans un wagon de chemin de fer en mouvement rectiligne uniforme relativement à un sédentaire debout sur le quai. Le mouvement du train par rapport au quai a cette direction \rightarrow , de gauche à droite. Chacun des deux protagonistes tient dans ses mains une balle qu'il lâche verticalement à l'instant où il passe devant l'autre. Pour chacun d'eux, il lui apparaît que sa propre balle tombe verticalement à ses pieds. Cette trajectoire est analogue au temps propre de chacun des protagonistes, ce que Bergson appelle le temps vécu ou la durée. Cette durée est bien identique pour le voyeur comme pour le sédentaire, de même que, analogiquement, la trajectoire des balles est la même pour tous les deux.

Evidemment si le train subit une accélération au moment où son passager lâche sa balle, celle-ci n'aura plus la même trajectoire que celle lâchée par le sédentaire sur le quai, les deux systèmes de référence ne sont plus symétriques ; on retrouve l'élément nouveau introduit par Langevin dans sa propre expérience, mais ce ne sont plus alors les conditions physiques initiales choisies pour réaliser cette expérience.

Maintenant, si le sédentaire observe la balle lâchée par le voyageur dans le train, il constatera cette trajectoire \searrow , déviée vers sa droite à lui, tandis que le voyageur observant la balle lâchée par le sédentaire sur le quai observera cette trajectoire \swarrow , déviée également vers sa propre droite. Par analogie, il s'agit des temps relatifs ralentis, ce que Bergson nomme du «néant dilaté».

En fait, tout se passe comme si Bergson s'était posé la question

suiuante : quelle est la vraie trajectoire de la balle du voyageur, celle-ci \downarrow ou celle-là \searrow ? Elle ne peut auoir les deux en même temps, or la seule trajectoire qui ait un impact physique est celle-ci \downarrow , puisque la balle se trouve bien au pied du voyageur. Il se pose ensuite la même question au sujet de la trajectoire de la balle du sédentaire et aboutit à la même conclusion. Toute l'erreur de Bergson est bien là : il n'est pas nécessaire de déterminer la vraie trajectoire de la balle, car toutes les deux sont aussi réelles l'une que l'autre ; elles dépendent simplement du système de référence choisi, le train ou le quai. Toutes les deux ont également la même réalité physique.

Pour s'en convaincre, il suffit d'imaginer que le voyageur lâche sa balle sur le quai et que le sédentaire lâche la sienne dans le train. Prenons le cas de la balle du voyageur : pour lui elle tombera toujours à sa verticale, mais sur le quai, tandis que pour le sédentaire elle lui apparaîtra déviée vers la droite et tombera à sa droite sur le quai. Dans ce cas la balle lâchée par le voyageur a bien pour le sédentaire un impact physiquement observable. Il en va de même pour la balle lâchée par le sédentaire dans le train. Par analogie, le temps relatif a bien une réalité physique aussi grande que le temps propre, ce que Bergson n'avait pas compris.

Pour transposer cette expérience imaginaire dans le cas de figure imaginé par Langevin, il suffit de supposer que le voyageur et le sédentaire possèdent chacun deux horloges, l'une marquant son temps propre et l'autre marquant le temps relatif de son comparse. Chacun, au retour, pourra constater que l'horloge marquant le temps de l'autre est en retard sur la sienne mais que celle marquant leur temps propre indique la même heure. Cette conclusion, qui est en fait celle de Bergson, exprimée autrement, est inévitable, sinon il faut reconnaître qu'il existe un moyen physique de déterminer si un référentiel d'inertie est en mouvement ou au repos, ce qui revient à rejeter la relativité.

La seule objection que l'on puisse faire à ce raisonnement est que l'expérience de Langevin est impossible physiquement sans faire entrer en jeu des accélérations, autrement dit que le voyageur et le sédentaire ne pourront jamais se retrouver pour effectuer la comparaison des horloges évoquée plus haut, s'ils ne quittent pas leur référentiel d'inertie, mais cette condition était justement celle imposée par Langevin, dès lors on ne peut reprocher à Bergson de l'avoir respectée.

Ainsi, il apparaît clairement que c'est l'expérience même de Langevin qui est mauvaise car elle ne rentre pas dans le cadre de la relativité restreinte. Il faut donc l'abandonner et reconnaître à Bergson que son raisonnement était fondamentalement juste, même si certaines de ces conclusions étaient fausses.

5. Une équivoque qui divise les physiciens

Il ne suffit pas de montrer que le paradoxe de Langevin n'est pas un point de départ satisfaisant pour la réflexion d'un philosophe, encore faudrait-il que les physiciens, eux aussi, cessent de le prendre au sérieux, en affirmant que sa solution est triviale. Ainsi, ils éviteraient la pluralité de ces interprétations, dont Tonnelat donne la synthèse la plus claire dans son *Histoire du principe de relativité* ¹³.

Tout le monde admet aujourd'hui, affirme-t-elle, que ce paradoxe ne relève pas strictement de la relativité restreinte car il fait intervenir des accélérations. Mais après cette remarque préliminaire, l'auteur distingue trois attitudes parmi les scientifiques. Les deux premières attitudes se placent exclusivement dans le cadre de la relativité restreinte, ce qui est contradictoire avec la remarque précédente. A quoi sert de reconnaître que le paradoxe ne relève pas exclusivement de la relativité restreinte si c'est pour ensuite le résoudre exclusivement dans ce cadre ? Quoiqu'il en soit, dans ce premier groupe, il y a deux attitudes différentes.

D'une part les «opposants», comme les qualifie Tonnelat, refusent la conclusion du paradoxe, à savoir que le voyageur est plus jeune que le sédentaire, car si cela était, il y aurait alors un moyen physique de distinguer entre un référentiel galiléen en mouvement d'un référentiel au repos, ce qui est en contradiction avec le principe de relativité. Pour ces «opposants» le voyageur et le sédentaire se voient respectivement moins vieillir durant le voyage, mais lors du retour ils sont d'accord sur leur âge respectif. On retrouve là le raisonnement de Bergson, ce que personne n'a jamais souligné clairement, pas même Tonnelat qui avait pourtant trouvé des circonstances atténuantes à Bergson. C'est un raisonnement qui ne contient pas de contradiction interne.¹⁴

L'autre attitude, parmi ceux qui restent dans le cadre de la relativité restreinte, est celle des «acceptants», selon l'expression de Tonnelat. Selon les «acceptants», le voyageur est bien plus jeune que le sédentaire, ce qui est normal puisque son référentiel n'est pas un référentiel d'inertie, il est donc naturel de pouvoir mesurer des différences physiques entre les deux. Mais les «acceptants» ajoutent que la solution se déduit de la relativité restreinte si l'on néglige les accélérations. Or si l'on néglige les accélérations, les deux référentiels redeviennent des référentiels d'inertie entre lesquels il n'est plus possible, par définition, de faire la différence au moyen d'expériences physiques. Là encore, Tonnelat ne le dit pas, mais on retrouve la contradiction dans laquelle Langevin lui-même s'est constamment enfermé comme nous l'avons montré. Ceci devait être souligné, car cela prouve que si l'on reste dans le cadre de la relativité restreinte, le raisonnement de Bergson est plus solide que

celui de Langevin, même si physiquement les conclusions de Bergson ne sont pas acceptables contrairement à celles de Langevin.

La troisième attitude, toujours selon la terminologie de Tonnelat, est celle des «généralisateurs», qui ne posent et résolvent le paradoxe de Langevin que dans le cadre de la relativité généralisée. Etant donné que Langevin lui-même ne s'est jamais placé dans ce cadre, qui est pourtant le seul adapté à son expérience mentale, il n'est pas nécessaire d'examiner plus avant ce point de vue au demeurant incontestable.¹⁵

Par ailleurs, l'expérience réalisée en 1971 par J. Hafele et R. Keating est généralement considérée comme ayant apporté la preuve définitive de la validité de la situation imaginée par Langevin.

Dans cette expérience, un avion embarquant une horloge atomique fait le tour de la Terre vers l'Est puis vers l'Ouest, le temps marqué par l'horloge embarquée est ensuite comparé avec celui d'une horloge restée sur Terre. Les différences de temps ainsi constatées coïncident avec celles prévues par les calculs. Le compte-rendu que nous avons consulté¹⁶ ne précise pas si la comparaison des temps se fait alors que l'avion est encore en vol avec sa vitesse de croisière ou après l'atterrissage, dans le premier cas les conditions de l'expérience de Langevin ne seraient pas réunies, mais l'essentiel n'est pas là.

En effet, cette expérience repose sur le raisonnement suivant (qui n'est pas clairement exposé dans la source que nous avons consultée) : lors de ses deux voyages l'avion met environ 48 heures pour faire le tour de la Terre et revenir à son point de départ (en fait 41,2 heures quand il a volé vers l'Est et 48,6 heures quand il a volé vers l'Ouest, les variations de la durée du trajet dépendant de la circulation atmosphérique générale). Quand l'avion vole vers l'Est, dans le sens de rotation de la Terre, l'aéroport a accompli durant son trajet deux rotations, l'avion, pour revenir à son point de départ en accomplit donc trois, il en résulte que l'horloge embarquée doit ralentir par rapport à celle restée sur Terre puisqu'elle a volé plus vite, couvrant une plus grande distance dans le même laps de temps. En revanche si l'avion vole vers l'Ouest, toujours en 48 heures, lorsqu'il revient à son point de départ il a accompli une rotation de moins que la Terre, son horloge a donc tourné plus vite que celle restée au sol puisque l'avion allait plus lentement que la Terre.

Ce raisonnement sous-entend que les rotations de l'avion et celle de la Terre sont mesurées à partir d'un troisième référentiel qui est considéré au repos, en l'occurrence il s'agit du Soleil dont le passage au méridien permet de calculer le nombre de rotations de la Terre. S'il n'en était pas ainsi, on ne pourrait pas prévoir de

A propos du paradoxe de Langevin

différence entre un voyage de l'avion vers l'Est et un autre vers l'Ouest. En effet, si l'on prenait la Terre comme référentiel au repos, que le voyage se passe vers l'Est ou vers l'Ouest, il entraînerait toujours un ralentissement du temps propre de l'avion.

Ainsi, les modalités de cette expérience supposent-elles qu'il est possible de calculer le temps de ce référentiel commun à la Terre et à l'avion, le temps du système solaire, qui est plus lent que celui de la Terre et de l'avion. Or ce temps propre du système solaire, l'expérience le présuppose mais ne le mesure pas. Cette expérience est donc fondée sur la réintroduction implicite du repos absolu et, partant, d'un espace et d'un temps absolu, relativement auquel est mesuré celui de la Terre comme celui de l'avion. A tout le moins, cette expérience nécessite un référentiel privilégié, ce qui est en contradiction avec le postulat de la relativité selon lequel tous les référentiels sont équivalents.

En d'autres termes, cette expérience prouve que le phénomène mesuré n'est pas réciproque (relativement à un avion volant vers l'Est le temps de la Terre n'est pas plus lent), ainsi interprété ce résultat est plutôt une preuve contre la relativité ! (En fait la réciprocité existe mais entre le référentiel système solaire d'une part et les référentiels Terre et avion de l'autre).

Ce résultat souligne le paradoxe de Langevin plus qu'il ne le résoud. Pourtant, l'extrême précision des résultats obtenus par cette expérience, leur concordance avec les calculs prévisionnels apparaissent comme devant clore définitivement le débat. Mais si le but de cette expérience était de prouver, encore une fois, que les effets relativistes de la dilatation du temps existent et ont des conséquences physiques observables, ce fait était déjà amplement confirmé par d'innombrables expériences et observations physiques et cette expérience de Hafele et Richard n'était pas nécessaire, si ce n'est pour frapper les esprits ; en revanche, si cette expérience devait clore le débat sur le coeur même du paradoxe de Langevin, il apparaît alors qu'elle n'a pas atteint ce but.

Conclusion

Langevin, en formulant son expérience imaginaire, voulait montrer que le ralentissement du temps dans un référentiel en mouvement relatif était une réalité physique ayant des effets observables, cette conclusion est indiscutable. Mais ces effets sont relatifs ; faire revenir le voyageur pour constater ces effets est une absurdité, car, dès lors, les effets observables dus aux mouvement relatif des deux référentiels ne peuvent plus exister puisque ce mouvement relatif n'existe plus. Il n'en va évidemment pas de même si l'un des référentiels a été soumis à une accélération. Ainsi cette expérience de

pensée est mauvaise par principe car elle ne peut avoir lieu sans accélération, c'est pourquoi elle induit en erreur non seulement le profane mais aussi le philosophe et même le physicien. Les services qu'elle peut rendre pour obliger l'esprit à abandonner ses habitudes de pensée pèsent peu en regard des erreurs qu'elle entraîne, pour peu que les conditions de cette expérience soient prises au sérieux comme point de départ d'une réflexion sur le temps dans le cadre de la relativité restreinte. Pour ces raisons elle doit être abandonnée.

Bibliographie

Barreau, H.

- 1973 Bergson et Einstein, *Etudes bergsoniennes*, X, 73-134.
1974 Bergson et la théorie de la relativité, *Cahiers Fundamenta Scientia*, 4.

Bergson, H.

- 1922¹ *Durée et simultanéité, à propos de la théorie d'Einstein* (Paris : Alcan).
1922² Diskussionsbemerkungen auf der Sitzung vom 6. April, *Bulletin de la Société française de philosophie*, 17, 102-107.
1924 Les temps fictifs et le temps réel, *Revue de philosophie*, 31, 241-260.

Brandes, J.

- 1995 *Die relativistischen Paradoxien und Thesen zu Raum und Zeit, Interpretationen der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie*, 2. erw. Auflage (Karlsbad : Verlag relativistischer Interpretationen).

Cherki, M.

- 1972 Paradoxe des jumeaux : la réponse des horloges atomiques, *La Recherche*, 3, 978.

Fleury, P., Kastler, A. et Mathieu, J.-P.

- 1991 Langevin (voyageur de), in *Dictionnaire de physique* (Paris : Masson, Eyrolles).

Guillaume, E.

- 1922 La question du temps d'après M. Bergson, *Revue générale des sciences*, XXXIII, 573-582.

Hentschel, K.

- 1990 *Interpretationen und Fehlinterpretationen der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins* (Basel; Boston; Berlin : Birkhäuser).

A propos du paradoxe de Langevin

- Klein, E.
1991 *Conversations avec le Sphinx* (Paris : A. Michel).
- Langevin, P.
1911 L'évolution de l'espace et du temps, *Scientia*, X , 31-54.
1923 *La physique depuis vingt ans* (Paris : Doin).
- Levy, E.
1988 Jumeaux, paradoxe des jumeaux, in *Dictionnaire de physique* (Paris : PUF).
- Lorentz, H.A.
1914 Considérations élémentaires sur le principe de relativité, *Revue générale des sciences*, XV, 179-185.
- Metz, A.
1923 *La relativité, exposé élémentaire des théories d'Einstein et réfutation des erreurs contenues dans les ouvrages les plus notoires* (Paris : Chiron).
- Morand, M.
1922 Einstein au Collège de France, *Nature*, I, 315-320.
- Nordmann, C.
1922 Einstein expose et discute sa théorie, *Revue des deux mondes*, IX, 129-166.
1924¹ *Notre maître le temps, les astres et le heures. Einstein et Bergson* (Paris : Hachette).
1924² Einstein ou Bergson, *Atti del V Congresso Internazionale di Filosofia* (Naples), 488-509.
- Poncelet, G.
1972 *Considérations épistémologiques sur la théorie de la relativité* (Bologna : Azzoguidi), "Publicazione a cura del Centre superiore di logica e scienze comparate", 5.
- Prokhovnik, S.J.
1989 The Twin Paradoxes of Special Relativity : their Resolutions and Implications, *Foundations of Physics* 19, 541.
- Tonnellat, M.A.
1971 *Histoire du principe de relativité* (Paris : Flammarion).

Notes

- 1 Klein [1991], p. 151.
- 2 Langevin [1911], p. 31-54.
- 3 Langevin [1923].
- 4 Langevin [1923], p. 288-291.

- 5 Lorentz [1914], p. 179-185.
- 6 Morand [1922], p. 315-320.
- 7 Morand [1922], op. cit.
- 8 Bergson [1922].
- 9 Metz [1923].
- 10 Barreau [1973], p. 73-134. Voir aussi sur cette question : Barreau [1974], Bergson [1924], Bergson [1922²], Hentschel [1990], Nordmann [1924¹ et ²].
- 11 Tonnelat [1971], op. cit., p. 203.
- 12 Guillaume [1922], p. 573-582.
- 13 Tonnelat, op. cit., p. 211-226.
- 14 Ce raisonnement est exposé avec une grande clarté par Elie Levy, in Levy [1988].
- 15 C'est le point de vue de J. P. Mathieu, A. Kastler et P. Fleury, développé in Fleury, Kastler et Mathieu [1991].
- 16 Cherki [1972], p. 978.