

CENT ANS ?¹Alexis de Saint-Ours²

alexis.de-saint-ours@u-paris.fr

Résumé: Le voyage en boulet occupe une place importante dans *Durée et Simultanéité*. Les arguments avancés par Bergson – pour conclure à tort à la réciprocity des expériences des jumeaux – ne sont pas sans rappeler ceux de Herbert Dingle dans sa controverse avec McCrea. Les versions épurées du pseudo-paradoxe des jumeaux, avec accélération et sans différence d’âge et celles sans accélération et avec différence d’âge, montrent qu’il n’y a pas de sens à vouloir localiser en un point précis d’une ligne d’univers – en l’occurrence au point de rebroussement – la discordance des âges. Si l’ouvrage de Bergson souffre indéniablement de maladresses et de contre-sens, parfois partagés par les physiciens de son époque, il n’en demeure pas moins notable que les tentatives contemporaines de construction d’une théorie quantique de la gravité sont traversées par d’inédits questionnements sur la nature du temps et résonnent tout particulièrement avec certaines intuitions bergsoniennes.

Mots-clés: Pseudo-paradoxe des jumeaux, surrationalisme, gravité quantique, évolution relationnelle, devenir.

Il est cocasse de célébrer le centenaire d’un ouvrage consacré à l’examen critique de la relativité restreinte, dans laquelle la durée écoulée entre deux événements est relative au référentiel choisi pour effectuer la mesure. Sous l’influence de Paul Langevin et de Hermann Weyl, la « relativité des durées » s’est transformée en une amusante expérience de

¹ Recebido: 16-12-2022/ Aceito: 07-03-2023/ Publicado on-line: 09-04-2023.

² É professeur da Université Paris-Cité (UFR), Paris, França.

pensée autour de jumeaux : l'un part vite et loin et revient plus jeune que son frère. Célèbre-t-on les 100 ans vécus par Paul, le jumeau voyageur, ou ceux de Pierre, le jumeau sédentaire ? Afin d'honorer le caractère relativiste de cet anniversaire – comment pourrait-il en être autrement ? – il sera d'abord question des 3 appendices controversés sur le pseudo-paradoxe des jumeaux qui sont pour Bergson l'occasion de préciser les paragraphes sur le voyage en boulet du chapitre IV de *Durée et Simultanéité*. L'accent sera mis sur ce qui a tant fait débat chez Bergson et d'autres, à savoir le rôle de l'accélération et la dissymétrie entre les jumeaux. On suppose connu du lecteur les rudiments de relativité restreinte que l'on trouvera dans tout bon manuel³.

Analyse et déconstruction du pseudo-paradoxe des jumeaux

Dans l'article de 1905, « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement », Einstein écrit :

Si deux horloges synchrones se trouvent en A et que l'on déplace l'une d'entre elles à vitesse constante le long d'une courbe fermée, jusqu'à ce qu'elle soit revenue en A, opération qui dure t sec., cette horloge, à son arrivée en A, retarde de $\frac{1}{2}t \left(\frac{v}{V}\right)^2$ sec. sur l'horloge qui n'a pas bougé. (EINSTEIN, 1993, p. 42)

C'est en 1911, au IV^{ème} Congrès International de Philosophie de Bologne, que Paul Langevin imagine un voyageur partant dans le cosmos dans un projectile animé d'une vitesse proche de celle de la lumière. Le voyageur revient sur terre et

³ Par exemple ceux de Boratav & Kerner (1991) et Taylor & Wheeler (1970).

retrouve notre globe vieilli de 200 ans alors que lui n'a vieilli que de 2 ans. Le paradoxe des jumeaux traite de la comparaison en un même point d'espace de deux temps propres⁴.

Le voyage est constitué de cinq étapes :

- 1) La période d'accélération initiale de la fusée.
- 2) À la fin de cette période, la fusée est animée d'une vitesse V , constante et proche de la vitesse de la lumière.
- 3) La fusée fait demi-tour pour se diriger vers la Terre.
- 4) À la suite de cette deuxième période d'accélération, la fusée est de nouveau animée d'une vitesse uniforme V .
- 5) Enfin, la fusée décélère pour atterrir.

L'ensemble du voyage est représenté, du point de vue du référentiel terrestre, dans le diagramme d'espace-temps suivant :

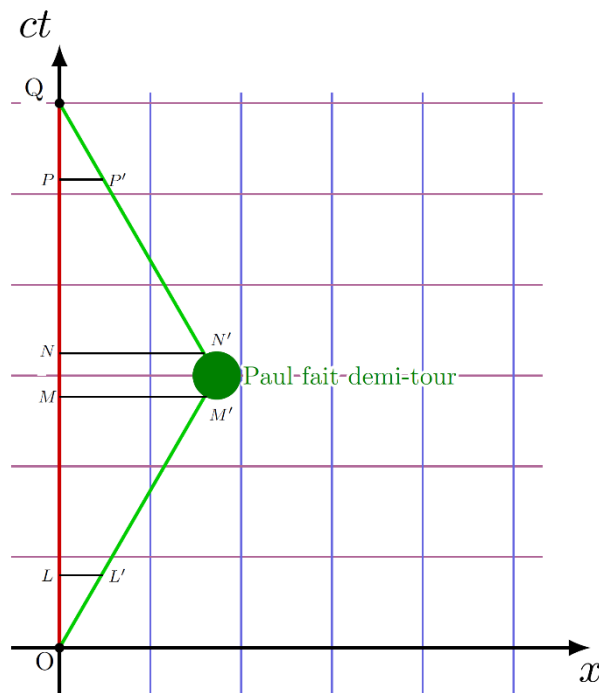


Figure 1

⁴ « Sous le nom de "paradoxe des horloges", on désigne cette comparaison des temps propres de deux observateurs qui ont été, momentanément, attachés à des systèmes galiléens différents et qui effectuent finalement, dans un même système de référence, la comparaison de leurs vieillissements respectifs ». (TONNELAT, 1971, p. 205).

Les trois lignes⁵ OL', M'N' et P'Q représentent les trois périodes d'accélération ou de décélération de la fusée. Les événements représentés par les points L, M, N et P sont simultanés (à temps constant), pour un observateur du référentiel R, avec les événements représentés par les points L', M', N' et P'. On suppose que les périodes d'accélération sont négligeables au regard de l'ensemble du trajet. En effet, la durée du voyage peut être étendue indéfiniment sans affecter aucunement les durées des accélérations.

Du point de vue des mesures de Pierre, Paul enregistre un temps plus court le long de L'M' que Pierre n'enregistre le long de LM. De même pour N'P' et NP. On en déduit donc que du point de vue de Pierre, Paul a enregistré un temps plus court que Pierre durant le voyage. Mais si l'on remarque qu'à l'aller comme au retour, Paul est au repos dans un référentiel inertiel par rapport auquel la Terre est en mouvement, alors on peut conclure qu'au terme du voyage, du point de vue des mesures de Paul, Pierre a enregistré un temps plus court que Paul entre les événements « départ » et « retour » de la fusée.

On voit bien qu'il n'est pas suffisant de rétorquer que l'absence de symétrie provient du fait que Pierre est resté au repos dans le référentiel inertiel de la Terre alors que Paul a subi des accélérations et ce parce que l'on a supposé que les durées des accélérations au départ et à l'arrivée sont négligeables, aussi bien du point de vue de Pierre que du point de vue de Paul. Pourtant, l'affirmation qui consiste à dire que Pierre a enregistré un temps plus court que Paul au terme du voyage, est fautive, car, du point de vue de Paul, elle ne tient

⁵ Idéalement incurvées mais elles ne sont pas dans le diagramme d'espace-temps présenté ici.

pas compte de la totalité de la durée mesurée par Pierre⁶. Le point clé qui permet de lever le paradoxe, consiste à remarquer que le critère de simultanéité n'est pas le même pour Paul à l'aller et au retour alors que Pierre garde tout le long du voyage le même critère de simultanéité⁷. Le diagramme suivant illustre cela :

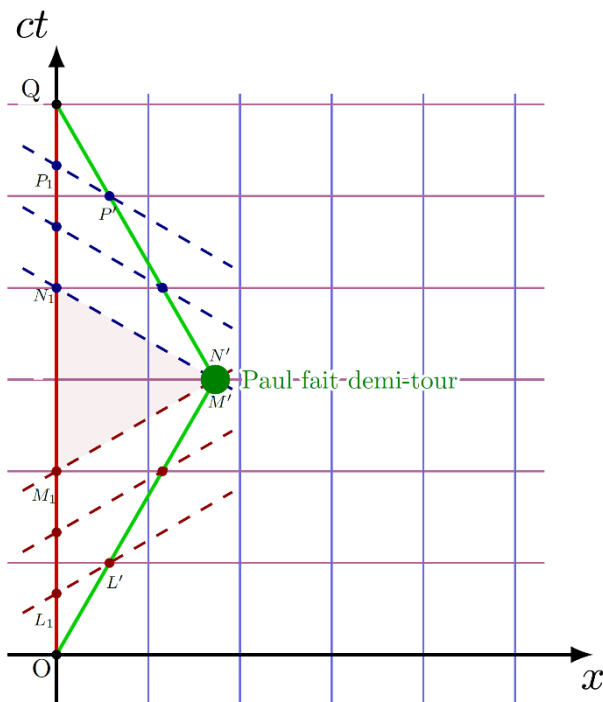


Figure 2

Dans ce diagramme d'espace-temps, les lignes pointillées représentent les lignes de simultanéité dans les deux référentiels de la fusée, à l'aller et au retour. Comme on peut le constater, les événements L_1 et M_1 sont simultanés avec L' et M' dans le premier système de référence de la fusée et les événements N_1 et P_1 sont simultanés avec N' et P' dans le

⁶ Alors que la proposition qui consiste à affirmer que du point de vue de Pierre, c'est Paul qui enregistre le temps propre le plus court entre les événements « départ » et « retour » de la fusée reste vraie.

⁷ Comme on peut le voir à la figure 1.

deuxième système de référence de la fusée. Cette duplication de la simultanéité autorise à dire que du point de vue de Paul, les durées L_1M_1 et N_1P_1 sont respectivement plus brèves que les durées $L'M'$ et $N'P'$. En aucun cas cela ne permet de conclure que du point de vue de Paul, c'est l'horloge de Pierre qui a enregistré le temps le plus bref entre les événements « départ » et « retour » de la fusée. Cette proposition est fautive car elle omet de prendre en considération le temps de Pierre entre M_1 et N_1 .

Supposons que Paul embarque à bord d'une fusée, dont la vitesse est $0.66c$, et voyage vers l'étoile X. Dans le référentiel de la Terre, X est à une distance de 2.67 années-lumière (a.l.). Calculons les temps propres des jumeaux entre les événements « départ de Paul » et « retour de Paul ». On suppose que les durées des accélérations sont négligeables au regard de l'ensemble du trajet. Notons que si $v = 0.66c$ alors le facteur de Lorentz, $\gamma = (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}} \approx 1.33$. Il faut alors raisonner dans trois référentiels d'inertie distincts : celui de Pierre (disons R), celui de Paul à l'aller (R') et celui de Paul au retour (R''). Les mesures sont faites par les horloges propres de ces trois référentiels (que l'on notera respectivement H, H', H'').

Départ et retour de Paul mesurés par l'horloge H de Pierre : pour Pierre, Paul parcourt une distance totale de $2.67 \times 2 = 5.34$ à la vitesse de $0.66c$ en un temps total $\Delta t = \frac{5.34}{0.66} \approx 8$ ans.

Départ et arrivée de Paul à l'étoile X, mesurés par l'horloge H' de Paul : dans R', X est à une distance de $\frac{2.67}{\gamma} \approx 2$ a.l. et Paul parcourt cette distance à la vitesse de $0.66c$ en un temps

$$\Delta t' = \frac{2}{0.66} \approx 3 \text{ ans.}$$

Départ de Paul et retour de Paul mesurés par l'horloge H'' de Paul : $\Delta t'' = 3$ ans.

Au terme du voyage, Paul sait qu'il a vieilli de 6 ans et Pierre de 8 ans. De plus, Pierre s'accorde sur le fait que considérant séparément l'aller et le retour, les horloges H' et H'' qui accompagnaient Paul mesureraient une durée de $8/1.33$, soit 6 ans. Pierre est donc d'accord avec Paul en considérant que celui-ci n'a vieilli que de 6 ans pendant l'aller-retour qui pour lui a duré 8 ans. On retrouve le paradoxe si l'on affirme que pour Paul, l'horloge H de Pierre a enregistré un temps de $3/1.33 \approx 2.25$ années à l'aller et un temps de 2.25 années au retour. Ce raisonnement erroné ne tient pas compte du fait qu'au moment du changement de direction de Paul, son critère de simultanéité a changé.

Imaginons que Pierre envoie un signal lumineux à chacun de ses anniversaires ($F_s = 1$). À l'aller Paul reçoit le signal à la fréquence :

$$F_o = F_s \sqrt{\frac{c-V}{c+V}} \approx 0.45$$

Au retour, Paul reçoit le signal à la fréquence :

$$F_o = F_s \sqrt{\frac{c+V}{c-V}} \approx 2.21$$

À l'aller, Paul reçoit donc 0.45 signaux par an pendant trois ans ($0.45 \times 3 \approx 1.35$). Au retour, Paul reçoit 2.21 signaux par an pendant trois ans ($2.21 \times 3 = 6.63$). Il estime donc que Pierre a vieilli de 8 ans ($1.35 + 6.63$), en accord avec le temps propre de Pierre. Paul envoie lui aussi un signal lumineux tous les ans en direction de la Terre. Pierre reçoit le signal à la fréquence de 0.45 signaux par an à l'aller (4 ans) plus le temps mis par la lumière pour arriver jusqu'à lui à partir du

point de demi-tour (2.67 années). Donc à l'aller, Pierre reçoit le signal lumineux à la fréquence de 0.45 par an pendant 6.67 années. Au retour, Pierre reçoit 2.21 signaux par an pendant 1.33 années. À l'aller, Pierre estime que Paul a vieilli de $0.45 \times 6.67 = 3$ ans. Au retour, il estime que son vieillissement est de $2.21 \times 1.33 = 3$ ans. Pierre estime donc que Paul a vieilli de 6 ans pendant son voyage en accord avec les mesures propres de Paul. Les jumeaux sont donc parfaitement d'accord entre eux.

Venons-en maintenant à essayer de comprendre pourquoi, du point de vue de Paul, il est faux de dire que Pierre compte 2.25 années à l'aller et 2.25 années au retour. Juste avant le demi-tour, Paul calcule qu'il est contemporain de Pierre, qui, du point de vue des mesures de Paul, a vieilli de 2.25 années ($\frac{3}{1.33} \approx 2.25$) à l'aller. Une fois le demi-tour effectué, le critère de simultanéité de Paul change brusquement. Paul est alors contemporain de Pierre qui de son point de vue est maintenant âgé de $2.25 + 3.5$ (le temps de Pierre entre M_1 et N_1) = 5.75 années. Enfin, pour Paul, Pierre a vieilli de 2.25 années sur le retour. Paul considère donc qu'entre son départ et son retour, Pierre a vieilli de $2.25 + 3.5 + 2.25 = 8$ ans.

Puisqu'au point de demi-tour, en raison du changement de son critère de simultanéité, Paul se retrouve contemporain d'un Pierre plus vieux, il semble légitime de conclure que c'est – localement – au point de rebroussement, que Pierre est devenu plus vieux. C'est faux. Considérer qu'un vieillissement précoce a affecté Pierre en ce point, c'est donner une signification physique à ce qui n'en a pas. En effet, au demi-tour, il y a un changement du critère de simultanéité

de Paul mais cela n'a pas de signification physique puisque la simultanéité est définie de façon conventionnelle.

D'un point de vue géométrique, la chose est claire : le temps propre est à une ligne d'univers de la géométrie minowskienne ce que la longueur est à un trajet de la géométrie euclidienne. Les lignes d'univers qui partent de O pour aller à Q sont nombreuses et contrairement à l'inégalité triangulaire de la géométrie euclidienne, le temps propre entre deux événements le long d'une ligne d'univers courbe est inférieur au temps propre entre les deux mêmes événements pris le long d'une ligne d'univers droite.

Herbert Dingle et le paradoxe des jumeaux

Dans un article d'avril 1956, publié dans la revue *Nature*, Herbert Dingle⁸ provoqua une importante controverse autour du paradoxe des jumeaux en affirmant :

Le texte d'Einstein de 1905 contient une erreur très regrettable en affirmant qu'une horloge se déplaçant sur une courbe fermée, sera en retard sur une horloge stationnaire à son retour au point de départ. (DINGLE, 1956a)

S'ensuit alors une longue controverse entre Dingle et plusieurs physiciens dont McCrea. Comme on va le voir, les arguments avancés par le physicien britannique ne sont pas sans rappeler ceux de Bergson⁹.

Dingle nie que les temps propres du voyageur (V) et du sédentaire (S) puissent être différents au terme du voyage. Il

⁸ Après des études à l'Imperial College of Science and Technology, Dingle est nommé, en 1935, directeur du département de spectroscopie dudit collège. En 1951, il est élu Président de la prestigieuse Royal Astronomical Society. En 1922, il publie un texte de vulgarisation sur la théorie de la relativité et en 1940 il écrit un manuel de relativité restreinte. Dingle est aussi l'auteur de l'entrée « Relativité - conséquences philosophiques » de l'encyclopédie Britannica.

⁹ Dingle a rédigé l'introduction à la traduction anglaise de *Durée et Simultanéité*.

affirme que le principe de relativité implique qu'il est tout à fait équivalent de considérer V au repos dans un référentiel inertiel et S en mouvement rectiligne uniforme par rapport à lui. Pour le physicien anglais, il n'y a pas d'asymétrie entre le voyageur et le sédentaire, il est donc absurde et contraire au principe de relativité d'affirmer que l'horloge propre du sédentaire enregistre un temps plus long que l'horloge propre du voyageur. Dingle cite McCrea¹⁰ qui affirme qu'au terme du voyage, l'horloge de V marquera un retard de $2 T \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)$ sur l'horloge de S où T est la durée du voyage aller (ou retour) mesurée par S. Dingle note que selon McCrea, la quantité de retard peut être aussi grande que l'on veut du moment que T croît. En réponse à Dingle, qui soutient que S et V vivent des expériences symétriques, McCrea (1956a) affirme qu'au point de demi-tour, V subit une accélération qui le distingue absolument de S. Il explique que les horloges de S et V mesurent des intervalles d'espace-temps et comme la ligne d'univers de V est plus grande que la ligne d'univers de S, c'est V qui enregistre le plus court temps propre. Dingle (1956b) lui répond que c'est là une inutile généralisation du problème, que ce type d'argument mathématique n'explique pas *physiquement* pourquoi V est plus jeune que S au terme du voyage. Dingle demande une explication physique à la différence d'âge et refuse en conséquence tout argument mathématique.

L'année suivante, Dingle (1957) propose un syllogisme centré sur la notion de symétrie :

1) Selon la théorie de la relativité, si deux corps (comme

¹⁰ William H. McCrea, physicien et mathématicien anglais, se chargea, de 1956 à 1958, de répondre aux objections de Dingle.

par exemple deux horloges identiques) se séparent et se réunissent, aucun phénomène observable ne pourra, dans un sens absolu, indiquer que c'est l'un des corps plutôt que l'autre qui s'est déplacé.

- 2) Si deux horloges initialement synchronisées sont séparées puis réunies et que l'une d'elles indique un retard par rapport à l'autre, alors cette différence entre les durées implique que l'une est absolument restée au repos tandis que l'autre s'est absolument déplacée.
- 3) Par conséquent, si la relativité est vraie, les deux horloges doivent retarder également ou ne pas retarder du tout.

McCrea répond immédiatement en faisant remarquer que la majeure du syllogisme est fausse. Pendant le voyage aller de V, il imagine que chacun des deux protagonistes laisse tomber à ses côtés une particule témoin. Au retour de V, la particule témoin de S est toujours à ses côtés alors que celle de V est à des années lumières.

Dans une lettre de Dingle à Darwin¹¹ d'avril 1957 (voir CHANG, 1993), Dingle raffine sa position et insiste sur le fait qu'il ne refuse pas tant l'asymétrie entre S et V que les raisons invoquées pour l'expliquer. Il explicite son refus des arguments de McCrea en arguant du fait qu'on ne peut à la fois supposer les accélérations négligeables et les utiliser pour démontrer l'asymétrie. Et il ajoute qu'il ne comprend pas que l'on puisse à la fois invoquer l'accélération comme cause de l'asymétrie et reconnaître que, dans la différence d'âge des deux protagonistes, le facteur accélération n'apparaît pas

¹¹ Sir Charles G. Darwin, directeur, à l'époque de la controverse de 1956-1958, du National Physical Laboratory, fut l'un des premiers avec J.H. Fremlin, du département de physique de l'université de Birmingham, à donner un traitement du paradoxe des jumeaux via l'utilisation de l'effet Doppler.

puisque la différence de temps n'est fonction que de la vitesse de V et du temps T mesuré par S . Si l'accélération est la cause, comment se fait-il que l'effet soit seulement proportionnel à T ?

Dans un article de décembre 1957, Hermann Bondi, Professeur de mathématiques appliquées au King's College de Londres et auteur de *Relativity and common sense*, construit une analogie pertinente en réponse à Dingle. Il imagine deux automobilistes empruntant deux routes distinctes pour aller d'un point A à point B . L'un des deux emprunte le chemin en ligne droite tandis que l'autre fait un détour par C :

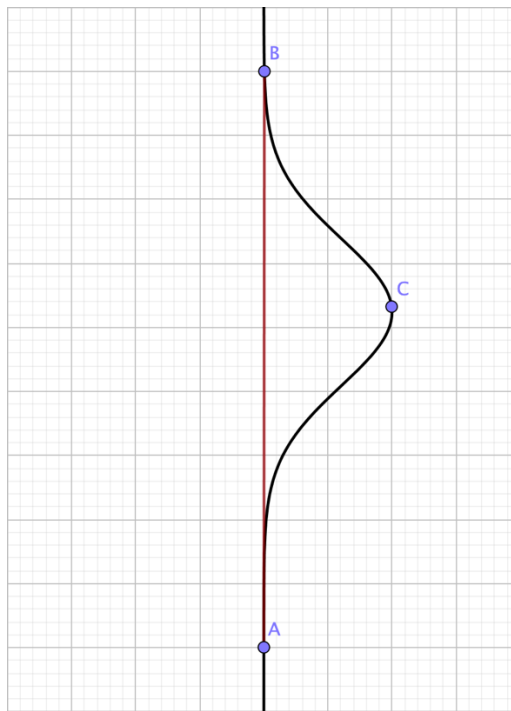


Figure 3

Puisqu'en géométrie ordinaire, le plus court chemin entre deux points est la ligne droite, le trajet AB sera plus court que les trajets AC puis CB . Mais si la longueur supplémentaire à parcourir par le deuxième automobiliste est due

à ce détour, elle ne réside pas pour autant dans le virage¹².

Se demander où se produit la différence d'âge, c'est supposer qu'il existe une asymétrie locale au cœur du pseudo-paradoxe des jumeaux et qu'il est possible de localiser en un point précis d'une ligne d'univers – en l'occurrence au point de rebroussement – la différence d'âge entre les deux jumeaux. Comme on va le voir, cela n'a pas de sens comme le montrent les versions du voyageur de Langevin avec accélération et sans différence d'âge et celles sans accélération et avec différence d'âge.

Le paradoxe des jumeaux dans un univers cylindrique¹³

Imaginons que Paul voyage à la vitesse de $\frac{3}{5}c$ vers un point situé à 15 années-lumière, ce qui donne pour le facteur de Lorentz : $\gamma = \frac{5}{4}$. Le modèle d'univers est celui d'un espace-temps cylindrique à deux dimensions dont la circonférence est de 30 années-lumière. Paul voyage à vitesse constante et uniforme autour du cylindre pour enfin retrouver Pierre qui estime que le trajet aller-retour a duré $2 \times \frac{15 \times 5}{3} = 50$ ans. Le temps enregistré par Paul au terme du voyage est de $\left(25 \times \frac{4}{5}\right) + \left(25 \times \frac{4}{5}\right) = 40$ ans. La trajectoire de Pierre est une ligne droite. L'apparente courbure de celle-ci ne résulte que du plongement du cylindre spatio-temporel dans un espace de dimension supérieure.

¹² « Suppose our second motorist follows a route consisting of a number of straight segments joined by short, sharp corners. Of course his route will be longer than the route of the motorist driving along the straight road. His route will be longer because it curves, but the actual length of the curves themselves is quite negligible compared with the extra length of his drive. In other words, and this is the essential point of the problem, although the extra length is due to the curves it does not lie in the curves. » (CHANG, 1993, p. 777).

¹³ D'après Weeks (2001), voir aussi : Barrow J. D. & Levin J. (2001), Brans & Stewart (1973), Dray T. (1990), Lehoucq R., Luminet J. P., Peter P. & Uzan, J. P (2002).

Contrairement à la version standard du paradoxe, il n'y a ni accélérations, ni demi-tour. La situation ne doit-elle pas être symétrique ? Paul ne doit-il pas conclure qu'il est $\frac{4}{5}$ plus vieux que Pierre ? Car de son point de vue, c'est lui qui est resté au repos. Pour comprendre l'absence de symétrie de la situation, examinons le diagramme d'espace-temps suivant :

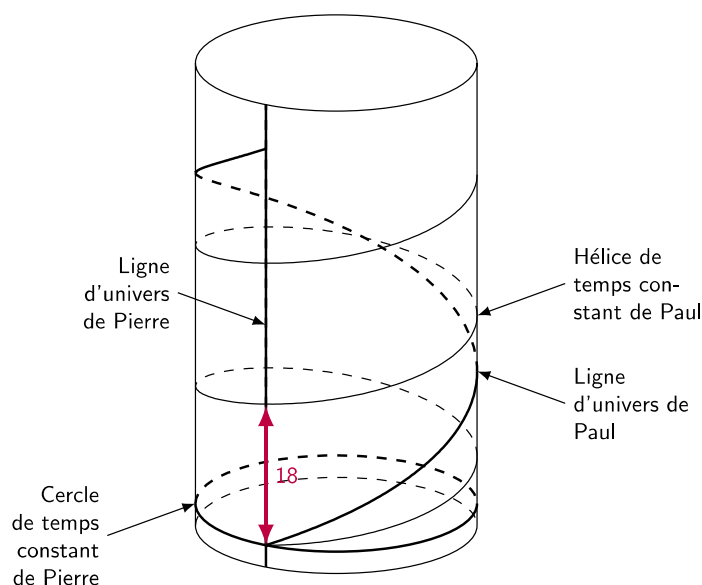


Figure 4

La ligne de temps constant ou de simultanéité de Paul est une hélice. Au départ de l'expérience, Paul calcule qu'il est contemporain, non seulement de Pierre à ses côtés, mais aussi d'une image de Pierre, 18 ans plus vieux¹⁴ et situé à une distance de 24 années-lumière¹⁵ de Paul¹⁶.

La figure suivante donne une coupe de cet espace-temps cylindrique le long de la ligne d'univers de Pierre :

¹⁴ $30 \times \frac{3}{5} = 18$.

¹⁵ Pour Paul, l'univers a une circonférence de $\frac{30}{7} = 30 \times \frac{4}{5} = 24$ années-lumière.

¹⁶ Paul considère qu'il est aussi contemporain d'une autre image de Pierre, 36 ans plus vieux, et située à une distance de 48 années-lumière et ainsi de suite si l'on considère que l'axe des temps est infini.

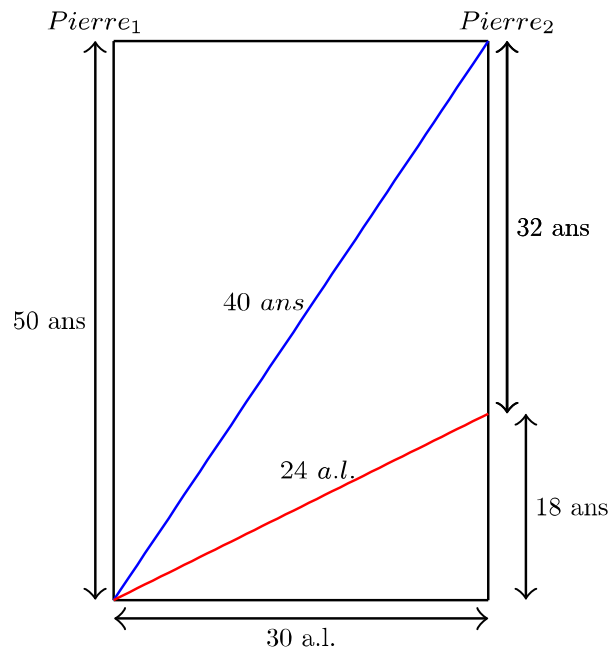


Figure 5

Paul considère, à son départ, qu'il quitte Pierre₁ et se dirige vers Pierre₂. Pour le voyageur, pendant toute la durée du voyage, l'horloge de Pierre enregistre un temps plus court que le sien ; à 40 ans de son temps propre, Paul considère que Pierre₂ est âgé de 32 ans¹⁷. Au terme du voyage, Paul rejoint Pierre₂, qui est $18 + 32 = 50$ ans plus âgé que Pierre₁. Bien évidemment Pierre₁ n'est rien d'autre que Pierre₂. Les jumeaux sont donc d'accord sur leur vieillissement respectif.

Comment comprendre cette asymétrie alors que la situation des jumeaux semble tout à fait réciproque ? On peut remarquer que Pierre occupe un système de référence tout à fait particulier, puisque c'est le seul système où les lignes de simultanéité sont des cercles. Dans tous les autres, ce sont des hélices. Or cette situation singulière de Pierre, a été déterminée par l'opération qui a consisté à refermer la

¹⁷ $40 \times 4/5 = 32$.

dimension d'espace sur elle-même (en collant les bords opposés). C'est donc la connexité globale de l'espace-temps qui détermine un système de référence privilégié et dans lequel le principe de relativité n'est plus valable que localement.

Cette version épurée du voyageur de Langevin élimine l'aspect inessentiel – l'accélération – et met évidence la pertinence du critère géométrique : c'est le jumeau voyageur qui est le plus jeune car sa ligne d'univers est plus longue que celle du sédentaire.

Le faux problème de la localisation de l'asymétrie

Mentionnons enfin, parmi tant d'autres, un article de 1989 de Boughn qui montre que, bien que l'accélération soit la clé de compréhension de la version standard du paradoxe des jumeaux, il est faux de penser que la différence d'âge entre le voyageur et le sédentaire est directement liée à ce paramètre. Boughn suppose que les jumeaux embarquent dans deux fusées identiques et qui contiennent la même quantité d'essence. La fusée de Paul est initialement positionnée à une distance x_0 à droite de celle de Pierre. Au début de cette expérience de pensée, les jumeaux sont au repos dans le référentiel de la Terre et au temps initial, ils accélèrent vers la droite. Une fois les fusées ayant consommé la totalité du carburant, les jumeaux sont au repos dans un référentiel S' en mouvement rectiligne et uniforme par rapport au référentiel S de la Terre. La vitesse finale de Paul est identique à celle de Pierre et se confond avec la vitesse v du référentiel S' . Au terme de leur accélération identique, Paul et Pierre sont donc de nouveau dans un référentiel inertiel. Boughn montre alors que les anniversaires sont simultanés dans S

mais pas dans S'. Paul est plus âgé que Pierre, son anniversaire a lieu $\gamma v x_0 / c^2$ avant celui de Pierre.

Boughn estime que la synchronisation des horloges est à la racine du pseudo-paradoxe des jumeaux. Deux horloges synchronisées et séparées par une distance propre x_0 dans un référentiel inertiel S sont désynchronisées d'une quantité $\gamma v x_0 / c^2$ pour un observateur d'un référentiel S' en mouvement rectiligne uniforme par rapport à S.

Dans la version standard du paradoxe, le demi-tour du voyageur a pour conséquence la désynchronisation des horloges respectives et compense amplement le ralenti apparent de l'aller puisqu'au terme du voyage, l'horloge du voyageur a enregistré un temps plus court que celle du sédentaire. Boughn conclut son article en remarquant que les jumeaux Paul et Pierre ont vécu d'identiques expériences locales (ils ont subi la même accélération pendant le même temps) mais pas d'identiques expériences globales (Paul était devant Pierre) et estime que cette asymétrie globale est le cœur du paradoxe des jumeaux.

Dans un commentaire de l'article de Boughn, Price et Gruber (1996) montrent qu'à la question de l'origine de la localisation de l'asymétrie temporelle entre les jumeaux, on peut d'un côté affirmer qu'elle a eu lieu avant le départ des jumeaux mais aussi après, ce qui montre que la question est dénuée de sens. Si la différence de durées est une notion parfaitement définie en relativité restreinte, celle de la localisation en un endroit particulier d'une ligne d'univers de ladite différence ne l'est pas. Les mêmes auteurs ont par la suite proposé une variante du pseudo-paradoxe avec accélération mais sans différence d'âge (PRICE and GRUBER, 1997).

Un seul temps réel

Le refus par Bergson de l'interprétation standard du voyage en boulet – le décalage des âges – est une conséquence de la thèse qu'il va défendre dans *Durée et Simultanéité* : le relativiste confond réel et possible lorsqu'il affirme que les transformations de Lorentz ont pour conséquence une dislocation de la simultanéité absolue et une multitude de durées désynchronisées tout autant réelles les unes que les autres :

En y regardant de plus près, nous n'avons jamais trouvé qu'un seul Temps réel, celui du physicien qui construit la science : les autres sont des Temps virtuels, je veux dire fictifs, attribués par lui à des observateurs virtuels, je veux dire fantasmatiques. (BERGSON, 2009, p. 167)

Bergson n'est pas ambigu sur le sujet, il n'y a qu'un seul temps réel, une seule durée susceptible d'être vécue, les autres sont fictives. Il cherche à le montrer tout au long de l'ouvrage et la « Remarque Finale » est très claire sur le sujet : « Mais dans un seul d'entre eux – nous pensons l'avoir démontré – il y a succession. Un seul d'entre eux dure, par conséquent ; les autres ne durent pas. » (Idem, p. 179)

Mais d'où vient cette confusion que Bergson pense avoir décelé dans la théorie de la relativité restreinte, comment se fait-il que cette dernière en soit venue à mettre sur le même plan réel et fictif et à ne pas reconnaître une seule durée réelle ? C'est le chapitre VI qui répond à cette question. Si les physiciens en sont venus à ne pas admettre qu'il n'y a qu'un seul temps réel, c'est parce que les relativistes ont inventé – avec l'espace-temps de Minkowski – une nouvelle façon de spatialiser le temps. Bergson propose donc une interprétation – qu'il qualifie de philosophique – de la

relativité restreinte dans laquelle il aurait montré que c'est en remplaçant la durée par de l'espace que les relativistes ont attribué des durées vécues aux temps désynchronisés des transformations de Lorentz :

Le mathématicien et le physicien doivent le faire puisqu'ils ne cherchent pas à interpréter en termes de réalité l'Espace-Temps de la théorie de la Relativité, mais simplement à l'utiliser. Au contraire, notre objet à nous est cette interprétation même. (Idem, p. 146)

Mais pour qui connaît un peu l'histoire de la relativité restreinte, une telle affirmation est pour le moins maladroite. Sans rentrer dans le détail, il faut tout de même souligner que l'ensemble des mathématiques de la théorie – simple au demeurant – existait avant 1905 et avait été élaboré par Poincaré, FitzGerald, Voigt et Lorentz. Tout le génie d'Einstein a justement été d'en donner la bonne interprétation physique. Dans l'article de 1905, il n'y a ni tour de force calculatoire, ni nouvelle théorie mathématique. Einstein ne fait que donner un sens physique à des formules qui n'en avaient pas ou peu jusqu'à lui, et ce en comprenant que nos concepts d'espace absolu et de temps absolu sont à revoir, si, comme cela découle des équations de Maxwell, la vitesse de la lumière dans le vide est constante. Qu'on y songe, en dépit de son apparente banalité, c'est un énoncé pour le moins contre-intuitif. Toutes les vitesses de nos vies ordinaires sont relatives au référentiel. Une vitesse constante – sous-entendu dans tous les référentiels – c'est pour le moins inhabituel. Einstein a pris au sérieux cette conséquence de l'électromagnétisme, tout comme les transformations de Lorentz, et a été – sans doute le premier – à comprendre les conséquences que cela avait sur les notions de longueur et de durées. Quand on

examine par ailleurs l'abondante littérature qu'il y a eu sur les paradoxes apparents de la relativité restreinte, voyageur de Langevin bien sûr, mais aussi paradoxe de la perche et de la grange, on réalise très vite qu'il n'y est question que d'interprétation ! Dans un tel cadre, il est difficile d'expliquer que le physicien calcule et le philosophe interprète.

On ne saurait par ailleurs reprocher à Bergson d'utiliser un vocabulaire inadéquat. Il était celui des physiciens de son temps¹⁸ à qui il manquait encore une nécessaire refonte épistémologique¹⁹. S'il n'est pas possible de suivre Bergson dans son interprétation de la théorie de la relativité, que reste-t-il alors de cet ouvrage ? D'abord un problème philosophique, celui de la durée ou plus exactement celui de la coexistence des durées dans un cadre relativiste²⁰. Mais on peut aussi se demander si certaines des questions soulevées par Bergson n'ont pas connu un écho dans la physique moderne et contemporaine ?

¹⁸ « En résumé, il nous faut conclure que, parmi les erreurs de Bergson, plusieurs d'entre elles – psychologiquement compréhensible – devraient mettre en garde les Relativistes contre des textes elliptiques, incomplets, peu compréhensibles et certainement mal compris. S'il a exprimé incorrectement ses critiques, Bergson a parfois, très justement, ressenti certaines subtilités et, peut-être, certaines déficiences moins de la théorie que de son expression. Son erreur est d'avoir demandé à la philosophie des prolongements que seule une réflexion plus profonde sur la physique aurait pu lui apporter. Néanmoins, les critiques de Bergson, ne nous semblent pas présenter la naïveté, l'anthropomorphisme qu'on pourrait être tenté de leur attribuer. » (TONNELAT, 1971, p. 293).

¹⁹ Sur laquelle a beaucoup insisté Jean-Marc Lévy-Leblond, qui soutient par ailleurs que la théorie de la relativité restreinte est une chronogéométrie et que les transformations de Lorentz sont à interpréter, non comme des effets de perspective – comme le soutient Bergson – mais comme des effets de parallaxe. (Voir LEVY-LEBLOND, 1996, voir également UNRUH, 1981).

²⁰ Comme l'argumente Élie During dans l'introduction au dossier critique de l'édition 2009 de *Durée et Simultanéité*.

Une postérité surrationaliste de *Durée et Simultanéité* ?

L'un des enjeux de la physique contemporaine est la construction d'une théorie quantique de la gravitation, à même d'unifier la mécanique quantique et la relativité générale. L'unification est toujours en cours et plusieurs théories s'opposent. Parmi elles, la gravité quantique à boucles propose une modification en profondeur des concepts de temps et d'espace. L'espace-temps newtonien et l'espace-temps minowskien ont en commun la présence d'une trame de fond : espace et temps absolus en mécanique classique, espace-temps en relativité restreinte. En relativité générale, la situation est radicalement différente, puisqu'en raison du principe de covariance généralisée – qui manifeste l'indifférence de la théorie au choix des coordonnées – la théorie d'Einstein ne possède pas de variables que l'on puisse naturellement identifier au temps. Manifestement, cela contredit la théorie quantique, cette dernière repose en effet sur une figure bien particulière du temps, en l'occurrence le temps newtonien. En d'autres termes, la variable t qui apparaît dans l'équation de Schrödinger est en contradiction flagrante avec la covariance de la relativité générale. En gravitation quantique canonique, l'équation de Wheeler-DeWitt ne contient pas de variable temps. Cette caractéristique inhabituelle est l'une des facettes de ce qu'il est convenu d'appeler le problème du temps en gravité quantique : la principale équation dynamique de la théorie ne prend pas en compte l'évolution *dans* le temps. Comment penser une évolution sans espace et sans temps posés *a priori* ? La dynamique ne peut plus être exprimée de façon usuelle, relativement à une structure absolue, mais cela n'implique pas que la relativité générale

rende caduque toute évolution ou dynamique.

En relativité générale, la localisation spatio-temporelle ne se fait pas relativement à une trame de fond inerte mais relationnellement. La relativité générale décrit le mouvement des différents objets les uns par rapport aux autres et non relativement à l'espace-temps. Toute une partie du travail de Carlo Rovelli (2004) a visé à montrer que, en relativité générale, ce n'est jamais l'évolution selon un certain temps t qui est mesurée, c'est l'évolution relative de variables dynamiques. Ce qui relève du changement en général est décrit non pas en termes d'évolution dans le temps mais en termes de corrélations de variables dynamiques. Ce caractère relationnel de l'évolution a conduit Carlo Rovelli à l'élaboration d'un formalisme susceptible d'élargir cette « physique sans temps », aussi bien à la mécanique classique qu'à la mécanique quantique. L'un des intérêts de ce formalisme est sa cohérence avec les aspects les plus pratiques de la mesure du temps. En effet, on ne mesure jamais le temps, on mesure bien plutôt les oscillations d'un pendule, les vibrations d'un cristal de quartz, l'écoulement d'un sablier ou encore la combustion d'une bougie. Nos mesures d'évolution sont toujours des corrélations de variables dynamiques. Par exemple, quand j'affirme – montre à l'appui – que mon pendule a réalisé vingt-cinq allers-retours en une minute, je ne fais que corréler deux variables dynamiques entre elles : le parcours de ma trotteuse sur 360 degrés et les oscillations plus ou moins périodiques dudit pendule.

Pour Bergson, le problème de la relativité restreinte est qu'elle efface la particularité de la durée, en y éliminant le devenir :

En ajoutant une dimension à l'espace où l'on se trouve, on peut sans doute figurer par une *chose*, dans ce nouvel Espace, un *processus* ou un *devenir* constaté dans l'ancien. Mais comme on a substitué du *tout fait* à ce qu'on aperçoit *se faisant*, on a d'une part éliminé le devenir inhérent au temps, et l'on a d'autre part introduit la possibilité d'une infinité d'autres processus par lesquels la chose eût été aussi bien construite. (BERGSON, 2009, p. 155)

Le formalisme relationnel de l'évolution proposé par Rovelli, qui met en œuvre des corrélations de variables dynamiques, est une réhabilitation en physique, d'une des caractéristiques du devenir. Il est une façon – si ce n'est d'échapper au travers de la spatialisation – tout du moins une tentative de s'en éloigner mais aussi une manière de destituer le temps de son statut de variable indépendante²¹.

Avec le concept de surrationalisme²², Bachelard a insisté sur la nécessité d'appréhender la physique dans son progrès créateur, sur sa faculté à incorporer critiques et insuffisances, afin d'intégrer en son sein, ce qui, à un moment donné de son histoire, lui échappe totalement et donc sur l'importance de penser une rationalité scientifique fluide et ouverte. La physique moderne et contemporaine semble donc animée – au moins partiellement – par certaines des intuitions du philosophe de la durée. Certes, parfois hors des traditions philosophiques, dans une lecture parfois sommaire, voire même déconnectée, du bergsonisme, mais dans

²¹ « la science moderne doit se définir surtout par son aspiration à prendre le temps comme variable indépendante » (BERGSON, 1907, p. 335).

²² « il faut rendre à la raison humaine sa fonction de turbulence et d'agressivité. On contribuera ainsi à fonder un surrationalisme qui multipliera les occasions de penser. » (BACHELARD, 1972, p. 7). Et : « Alors, au rationalisme fermé fait place le rationalisme ouvert. La raison heureusement inachevée ne peut plus s'endormir dans une tradition ; elle ne peut plus compter sur la mémoire pour réciter ses tautologies. Sans cesse, il lui faut prouver et s'éprouver. Elle est en lutte avec les autres, mais d'abord avec elle-même. Cette fois, elle a quelque garantie d'être incisive et jeune. » (*Op cit.*, p.12).

l'esprit surrationaliste thématized par Bachelard. Dans cette vitalité conceptuelle de la physique contemporaine, qui prolonge et vivifie les analyses bergsoniennes, sur la façon dont la science représente la durée, le temps mesurable et le devenir, il y a fort à parier que Paul et Pierre se seraient mis d'accord.

Abstract: The twin paradox is largely discussed in *Duration and Simultaneity* in which Bergson wrongly claims that there is no asymmetrical ageing of twins who separate and reunite. Few decades later, this point of disagreement with Einstein's theory was highlighted by Herbert Dingle who asserts that the special theory of relativity does not predict the asymmetry asserted. Variations on the pseudo-paradox, like the acceleration-free version in a cylindrical universe or the one in which twins undergo the same acceleration and yet age differently, clearly show that the question "where does the asymmetry aging occur" is meaningless. Nevertheless, some of Bergson's ideas find some echoes with attempts to construct a quantum theory of gravity in which conceptual issues about the nature of time and change appear to be fundamental.

Key words: twin paradox, surrationalism, quantum gravity, relational evolution, change.

Bibliographie

BACHELARD, G. *L'engagement rationaliste*. Paris : PUF, 1972.

BARROW, J. D. ; LEVIN J. The twin paradox in compact spaces. *Physical Review, A*, 63, 2001.

BERGSON, H. *L'évolution créatrice*. Paris : PUF, 2007.

BERGSON, H. *Durée et Simultanéité*. Paris : PUF, 2009.

BONDI, H. The Space Traveller's Youth. *Discovery*, 18, 505, 1957.

BORATAV, M.; KERNER, R. *Relativité*. Paris : Ellipses, 1991.

BOUGHN, S. P. The case of the identically accelerated twins. *American Journal of Physics*, 57, 791, 1989.

BRANS, C. H. ; STEWART, D. R. Unaccelerated-Returning-Twin Paradox in Flat Space-Time. *Physics Review*, D, 8, 1662, 1973.

CHANG, H. A. Misunderstood Rebellion. The twin-Paradox Controversy and Herbert Dingle's Vision of Science. *Studies in History and Philosophy of Science*, 24, 741, 1993.

DINGLE, H. Relativity and Space Travel. *Nature*, 177, 782, 1956(a).

DINGLE, H. *Nature*, 177, 785, 1956(b).

DINGLE, H. The Clock Paradox in Relativity. *Nature*, 180, 1275, 1957.

DESLOGE, E. A. ; PHILPOTT, R. J. Comment on "The case of the identically accelerated twins" by S. P. Boughn. *American Journal of Physics*, 59, 280, 1989.

DRAY, T. The twin paradox revisited. *American Journal of Physics*, 58, 822, 1990.

EINSTEIN, A. Sur l'électrodynamique des corps en mouvement. In : *Œuvres choisies, Relativités I*. Paris : Seuil, 1993.

HALSBURY, L. Space Travel and Ageing. *Discovery*. 18, 174, 1957.

LANGEVIN, P. L'évolution de l'espace et du temps : Conférence au IVème Congrès International de Philosophie de Bologne. *Scientia*, 10, 31, 1911.

LEHOUCQ, R.; LUMINET, J. P.; PETER, P.; UZAN, J. P. The Twin Paradox and Space Topology. *European Journal of Physics*, 23, 277, 2002.

LEVY-LEBLOND, J. M. *Aux contraires*. Paris : Gallimard, 1996.

LOW, R. J. An acceleration-free version of the clock paradox. *European Journal of Physics*, 11, 25, 1990.

MARDER, L. *Time and the space traveller*. Londres: George Allen & Unwin Ltd, 1971.

McCREA, W. H. A Time-keeping Problem connected with Gravitational Red Shift. *Helvetica Physica Acta*, Suppl. 4, 121, 1956(a).

McCREA, W. H. Relativity and Space Travel. *Nature*, 177, 784, 1956(b).

PRICE, R. H.; GRUBER, R. P. Paradoxical twins and their special relatives. *American Journal of Physics*, 64, 1006, 1996.

ROVELLI, C. *Quantum Gravity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

SARKAR, S.; STACHEL, J. Did Malament Prove the Non-Conventionalty of Simultaneity in the Special Theory of

Relativity? *Philosophy of Science*, 66, 208, 1999.

TAYLOR, E. F.; WHEELER, J. A. *A la découverte de l'espace-temps*. Paris : Dunod, 1970.

TONNELAT, M. A. *Histoire du principe de relativité*. Paris : Flammarion, 1971.

UNRUH, W. G. Parallax, distance, time, and the twin “paradox”. *American Journal of Physics*, 49(6), 1981.

WEEKS, J. R. The Twin Paradox in a Closed Universe. *American Mathematical Monthly*, 108, 585, 2001.