

# Parcours relativiste

Jean-François MULLER

Cet article est dédié à la mémoire de Raymond Baro, membre de l'Académie nationale de Metz et professeur de Physique à l'Université de Metz.

Dans les *Mémoires* 2005 de l'Académie, Raymond Baro écrivait en conclusion de son article sur les relativités : « Après Einstein, il n'existait plus d'éther, ni de temps absolu. La notion de simultanéité était complètement remise en doute et même l'espace euclidien était contesté par la nécessité de faire appel à des espaces à plus de trois dimensions ainsi qu'au concept révolutionnaire d'espace courbe. »

## Avant propos

Depuis l'année 2005, un certain nombre d'événements scientifiques nouveaux ont eu lieu, notamment la géolocalisation très précise, la mise en évidence du boson de Higgs et la découverte de nombreuses exoplanètes, le tout donnant un nouvel éclairage sur l'importance de la relativité restreinte. Il m'a paru intéressant de vous en donner une autre approche grâce à la parution de nombreux ouvrages consacrés à ce domaine pointu des sciences.

Tout récemment, le 17 avril 2014, une équipe internationale d'astronomes annonçait avoir découvert la première planète hors du système solaire, dont la taille soit comparable à celle de la Terre et sur laquelle l'eau pourrait en principe exister à l'état liquide, rendant ainsi la vie possible. Cette planète, dénommée « Kepler 186f », gravite autour d'une étoile de notre galaxie située à 490 années-lumière. Sachant qu'une année-lumière équivaut à 9452,6 milliards de km<sup>1</sup>, un simple calcul indique que cette exoplanète,

---

1. La vitesse de la lumière dans le vide est de 299 792,458 km/s. En multipliant ce chiffre par 3600 secondes x 24 h x 365 jours, la distance parcourue par la lumière en une année est de 9452,6 milliards de km.

éventuellement site d'une activité biologique, se situe à 4,6 millions de milliards de km ! Cette distance est si grande, qu'elle dépasse notre entendement.

Pourtant, si le voyage vers cette exoplanète pouvait être effectué à une vitesse très proche de celle de la lumière, par exemple à 99,94 % de celle-ci, le trajet aller-retour durerait pour le passager 487,4 années, soit  $490 \times 0,9994$  années comme nous pourrions le penser de prime abord ! Or, en prenant en compte la relativité restreinte d'Einstein, la durée effective du voyage ne serait que de 34 années.

De même, en prenant la même vitesse, le voyage aller-retour vers l'exoplanète de l'étoile  $\alpha$  du Centaure (cf. page 7 et 8), une des plus brillantes de la voûte céleste située seulement à 4,36 années-lumière de la Terre, la durée totale de l'aller-retour ne serait que de 110 jours<sup>2</sup> ! Comment est-ce possible ?

C'est ce paradoxe – « si lointain et pourtant plus proche » – qu'Einstein a mis en lumière dans sa célèbre publication<sup>3</sup> de 1905 sur la relativité restreinte. Je vais tenter de vous en donner la teneur en me référant notamment aux écrits simplificateurs de deux physiciens de l'Université de Manchester<sup>4</sup>. Pour atteindre cet objectif, notre « parcours » comportera trois étapes :

La *première* se situe en gare de Louvigny au sein de laquelle un dispositif expérimental virtuel a été mis en place pour mettre en lumière le principe de relativité du temps et de l'espace (cf. fig. 1).

La *deuxième* étape nous propulsera à Brookhaven près de New-York, sur l'île de Long Island. Ici, dans les années 90 avait été construit un synchrotron de 14 mètres de diamètre pour étudier les propriétés des particules élémentaires, notamment les muons, qui en les accélérant pouvaient atteindre une vitesse égale à 99,94 % de celle de la lumière. Elle nous permettra de valider expérimentalement la théorie d'Einstein.

Enfin, la *troisième* étape nous emmènera, comme le lecteur peut s'en douter, dans un voyage virtuel aller-retour vers l'étoile  $\alpha$  du Centaure à cette même vitesse de 99,94 % de la vitesse de la lumière. Toutefois, dans ce cas, l'imagination de David Cameron dans son film *Avatar* ne peut correspondre à la réalité. En effet, la seule exoplanète identifiée de cette belle étoile, visible surtout dans l'hémisphère sud, ne peut être viable car elle en est bien trop proche. De fait, elle devrait être surchauffée comme l'est la planète Mercure

2. Avec cet éclairage, le film de science-fiction *Avatar* de David Cameron paraît alors plus plausible. Toutefois, il convient de remarquer que la construction et l'envoi de vastes véhicules spatiaux, capables de vous emmener à cette vitesse très proche de la vitesse de la lumière, nécessiteraient des moyens titanesques hors de portée à l'heure actuelle.

3. EINSTEIN (Albert), *Les théories de la relativité restreinte et générale*, traduction française de Maurice Solovine, Presses Pocket, collection *Agora*, Gauthier-Villars, 1988.

4. COX (Brian) and FORSHAW (Jeff), *Why does  $E = Mc^2$* , University of Manchester, Da Capo Press, 2009.

dans notre système solaire et toute trace de vie y est hautement improbable. Les belles images 3D d'*Avatar* (cf. note 2) ne sont que fictions. Mais elles ont eu le mérite de faire rêver des millions de spectateurs et, pour notre part, elles nous permettront de mettre en exergue le fameux paradoxe des jumeaux.

## **Expériences en gare de Louvigny**

En fait, si j'ai choisi la gare de Louvigny c'est tout simplement parce qu'elle est en Lorraine ! D'autres gares TGV pourraient tout aussi bien faire l'affaire en France. Leur agencement est quasi le même : deux voies latérales, une dans chaque sens, permettent aux TGV de s'arrêter sans perturber l'avancement des TGV roulant sans arrêt sur les deux voies centrales. Si vous êtes sur le quai de cette gare attendant votre embarquement, il n'est pas rare qu'un de ces TGV déboule sur l'une des voies centrales en émettant un signal d'avertissement. À cette occasion, vous pouvez constater deux faits : i) – le sifflet du train devient plus aigu quand il s'approche et plus grave quand il s'éloigne. C'est l'effet Doppler ou Doppler-Fizeau<sup>5</sup> ; ii) – en même temps, le passage du TGV à 320 km/h, bientôt à 360 km/h, provoque un énorme déplacement d'air avec un bruit intense. L'impression de vitesse et d'énergie paraît décuplée. Pourtant cette vitesse n'est rien à côté de celle de la lumière, laquelle, ne l'oublions pas, n'a pas de masse !

Sur le quai de cette gare, une première horloge à lumière (n° 1) est installée. Elle est constituée de deux miroirs strictement verticaux séparés d'un mètre très exactement. Sur le premier d'entre eux, un laser continu est fixé émettant une lumière rouge dont la vitesse est notée par le symbole **c**. Le deuxième miroir placé le long du quai est semi-transparent. Celui-ci permettra de vérifier l'alignement du dispositif complet.

Dans un TGV, spécialement aménagé, une horloge à lumière strictement identique à la précédente (n° 2) est placée de façon à ce que la vitre externe du train soit remplacée par un miroir semi-transparent de la même facture que celui du quai.

Pour simplifier le dispositif, l'aménagement est conçu de telle façon que les deux miroirs semi-transparents, celui du quai et celui du train, soient disposés parallèlement l'un en face de l'autre également à une distance d'un mètre.

---

5. L'effet Doppler ou effet Doppler-Fizeau correspond au décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps (compression des fréquences lorsque le train se rapproche par exemple).

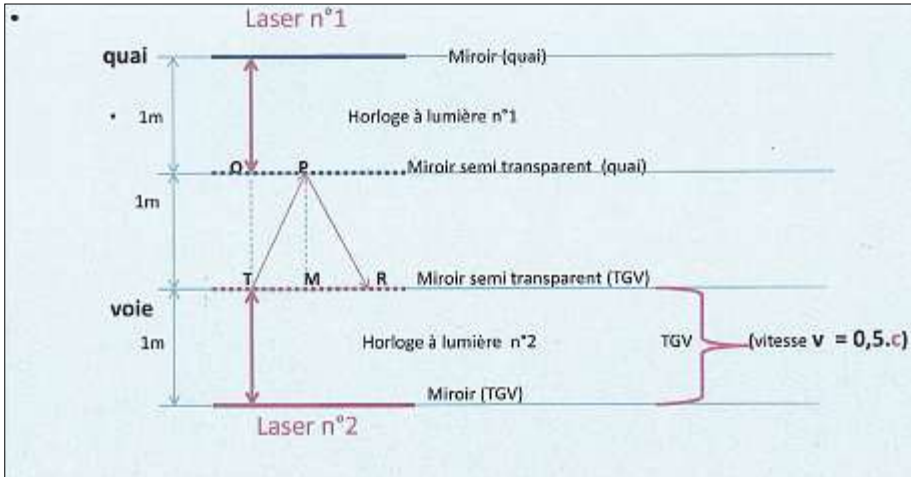


Fig. 1 : Dispositif expérimental mis en place en gare de Louvigny qui recouvre les trois cas de figure détaillés en figure 2. L'observateur sur le quai voit et contrôle « l'horloge à lumière n° 1 » et « l'horloge relative quai-train ». Dans le train, l'observateur n° 2 voit et contrôle « l'horloge à lumière n° 2 », mais n'a aucun moyen pour voir ce qui se passe à l'extérieur du train.

Lorsque le TGV est à quai, les deux horloges sont au préalable parfaitement synchronisées et alignées compte tenu que, pour chacune d'elle, la distance entre les deux miroirs est strictement égale à un mètre. Pour les deux horloges, le temps d'un aller et retour (ou tic-tac) de la lumière laser sera égal à 6,67 nanosecondes ( $t_0$ ):

Le temps  $t_0 = 2 \text{ mètres} / c = 2 \text{ m} / 299792458 \text{ m/s} = 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ s}$  soit 6,67 nanosecondes.

Pour simplifier, nous dirons que les deux horloges à lumière battent à la même fréquence de 150 millions de tic-tacs par seconde (en prenant la vitesse approchée de la lumière à 300000000 m/s):

La fréquence  $V = c / 2 \text{ m} = 150 \text{ millions de tic-tacs par seconde}$  soit 150 millions d'hertz (ou Hz).

Lorsque le train est à l'arrêt, les horloges sont alignées et synchronisées. Sur la figure ci-après les points, T et O, sont parfaitement alignés. Les spots lasers des deux horloges à lumière sont parfaitement superposés au niveau des pixels des deux miroirs semi-transparents du quai et du TGV.

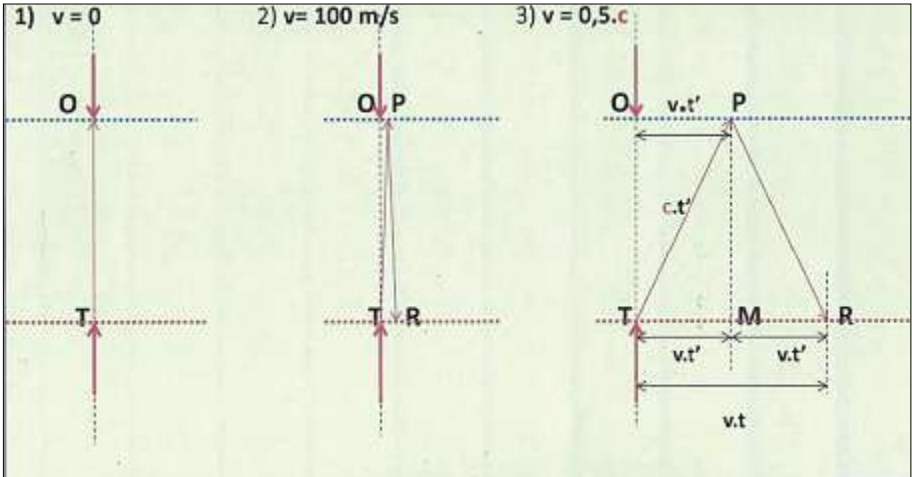


Fig. 2 :  $TM = OP$  correspond à la distance parcourue à la vitesse  $v$  (en m/s) pendant le temps  $t'$ . Pendant ce même temps  $t'$ , la lumière parcourt la distance  $TP$  à la vitesse de la lumière  $c$ . Le triangle rectangle  $TPM$  donne la relation de Pythagore  $TP^2 = TM^2 + PM^2$ . Sachant que  $PM$  est égal à 1 mètre, la relation de Pythagore s'écrit  $(c.t')^2 = (v.t')^2 + 1$ . La durée du tic-tac entre les deux miroirs semi-transparents du quai-train est égal à  $\underline{t} = 2 t'$ . La relation de Lorentz est donnée à partir du rapport de ce tic-tac  $\underline{t}$  avec le tic-tac  $t_0$  des horloges du quai ou du train (Cf. le texte en annexe).

Le TGV circule en premier lieu à la vitesse  $v$  de 360 km/h, soit 100 m par seconde ( $360\,000\text{ m}/3\,600\text{ s} = 100\text{ m/s}$ )<sup>6</sup>. Le décalage entre les deux lasers (point  $O$  et point  $P$ ) est inférieur au micron. Ceci est dû au fait que la vitesse du train ne représente que 0,33 millionième de la vitesse de la lumière. (cf. figure 2 : la distance  $OP =$  la vitesse en m/s multipliée par le temps exprimée en seconde soit  $s$ ).

Par contre, si notre TGV devenait « sidéral » et évoluait sous vide à une vitesse proche de la lumière (par exemple  $v_2 = 0,5 \times c$ , soit 50 % de la vitesse de la lumière) (fig. 2.3), le faisceau laser issu du train frapperait le miroir du quai au point  $P$  à une certaine distance du point de référence  $O$ . Ce faisceau est ensuite réfléchi et renvoyé vers la paroi externe du train comme l'indique la figure ci-dessus. Ces événements successifs peuvent être aisément enregistrés et mesurés avec les instruments optiques et électro optiques ultra-précis d'aujourd'hui. La distance  $OP = TM$  est égale à vitesse du train multipliée par

6. Ce sera la nouvelle vitesse commerciale des TGV lorsque la ligne Paris-Strasbourg sera terminée.

le temps  $t'$  mesuré au niveau du quai. La durée du tic-tac  $t$  de l'horloge à lumière train-quai est égal à 2 fois le temps  $t'$ .

Sur le quai, l'observateur n° 1 en déduit logiquement que le tic-tac du train vu du quai est plus long puisque le trajet de la lumière est plus grand (fig. 2.3). Il démontre que le rapport des deux tic-tacs  $t/t_0$ , appelé le facteur de dilatation du temps  $\gamma$ , est inversement proportionnel à la racine carrée de  $1-b^2$  où  $b$  représente la vitesse du train divisée par la vitesse de la lumière (cf. le texte encadré en annexe). Si la vitesse  $v$  tend vers  $c$ , le rapport  $\gamma$  tend vers l'infini<sup>7</sup> !

$$t/t_0 = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = 1 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = \gamma$$

Il ne faut pas oublier que le tic-tac train-quai de durée  $t$  n'a pu être mesuré que par l'observateur resté sur le quai. Toutefois, pour que l'horloge ait la même durée de pulsation, il faudrait que la lumière aille un peu plus vite. Or c'est impossible, car Einstein avait bien compris que la vitesse de la lumière était une constante universelle, conformément aux équations de Maxwell [ $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$ ]<sup>8</sup>, ce qui implique que la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs. Devant cette contradiction, il fallait bien admettre que les intervalles de temps n'ont pas la même durée lorsque la vitesse devient proche de celle de la lumière.

Ainsi, le temps absolu n'est pas compatible avec le fait que la vitesse de la lumière soit une constante universelle. Pour l'observateur resté sur le quai, l'écoulement du temps est ralenti dans le train en marche.

L'observateur resté sur le quai constate qu'un battement de son cœur (par exemple un battement par seconde, soit 60 battements par minute) correspond à 150 millions de tic-tac de l'horloge n° 1. Mais s'il regarde l'horloge train-quai, il constate qu'au bout de 150 millions de tic-tac, son cœur aura effectué un peu plus qu'un battement. Cela signifie qu'il vieillit plus vite que le passager du train. L'effet sera d'autant plus perceptible que la vitesse du train se rapproche de celle de la lumière ! Cette prévision paraissait à l'époque comme inimaginable et pourtant Einstein n'a pas hésité à la publier dès 1905. Elle n'a pu être vérifiée expérimentalement qu'une quarantaine d'années après sa mort.

7. Cf. le texte en annexe : le facteur de dilatation du temps  $\gamma$  est égal à 1,000 000 000 000 033 si  $v = 100$  m/s ; il est égal à 1,154 si  $v = 0,5c$  ; il est égal à 1,66 si  $v = 0,8c$  ; il est égal à 28,87 si  $v = 0,9994c$ . Enfin ce facteur  $\gamma$  serait égal à 31 622 si la vitesse était encore plus proche de celle de la lumière, c'est-à-dire  $v = 0,999\ 999\ 999c$ .

8. Voir MULLER (Jean-François), « Le quantique des Quantiques », *Mémoires de l'Académie nationale de Metz*, 2013, p. 59-73.

## La vérification expérimentale

Cette vérification expérimentale constitue la deuxième étape de notre promenade relativiste. Celle-ci se situe à Brookhaven dans l'État de New-York, sur l'île de Long Island, sur laquelle un synchrotron (*Alternating Gradient Synchrotron*) a été construit pour étudier les particules élémentaires en les accélérant à des vitesses proches de celle de la lumière<sup>9</sup>. Ce fut le cas, au début des années 1990, pour l'étude des muons que l'on appelle aussi les électrons lourds. Ils ont toutes les propriétés de l'électron, même charge et même spin, mais leur masse est 207 fois plus élevée que celle de l'électron, lequel, nous le savons bien, est constitutif des atomes et circule dans tous les fils électriques de notre vie quotidienne.

Toutefois, les muons ont aussi la particularité d'être instables avec une durée de vie très courte de 2,2 microsecondes soit 2,2 milliardièmes de seconde. Ils se décomposent pour donner des paires de particules subatomiques appelées neutrinos et in fine des électrons. Les physiciens de Brookhaven ont réussi à accélérer des muons à la vitesse de 99,94 % de la vitesse de la lumière, dans leur anneau synchrotron de 14 mètres de diamètre. Avec leur durée de vie de 2,2  $\mu\text{s}$ , les muons ne pourraient faire que 14 à 15 tours à cette vitesse. Or, ils en font un peu plus de 410 ce qui correspond à une durée de vie de **63  $\mu\text{s}$** , soit 29 fois plus qu'attendue ! C'est un fait expérimental parfaitement reproductible. Cette expérience a été notamment reproduite au CERN<sup>10</sup> à Genève.

Avec la vitesse  $v = 0,9994c$  et une durée de vie de 2,2  $\mu\text{s}$ , le facteur de dilatation du temps calculé est de 28,87, soit quasi-égal à 29. La prédiction est dans ce cas parfaitement vérifiée par l'expérience :

$$\Delta t / \Delta t_0 = 1 / (1 - \beta^2)^{1/2} = \gamma \quad \text{avec } \beta^2 = v^2 / c^2$$

$$\text{ainsi} \quad \Delta t = \Delta t_0 \cdot 1 / 0,0346 = 2,2 \times 28,87 = \mathbf{63,6 \mu\text{s}}$$

Or, à cette vitesse de  $0,9994c$ , un simple calcul montre qu'il est impossible de faire 410 tours en 2,2 ms ! Cela signifie que, pour le muon et son « avatar »<sup>11</sup>, accélérés à 99,94 % de la vitesse de la lumière, le chemin parcouru s'est contracté selon la relation suivante :

---

9. Notons que la même expérience a été reproduite par la suite au CERN à Genève.

10. CERN : Conseil européen pour la recherche nucléaire (1952), remplacé depuis 1954 par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire ; toutefois, l'acronyme initial a été conservé.

11. Le terme « avatar » est issu de la tradition hindoue où il correspond à l'incarnation d'une divinité sur terre. Il désigne ici l'apparence que prend un internaute, dans le cas présent un accompagnateur virtuel du muon.

$L = L_0 (1 - \beta^2)^{1/2}$  ( $L_0$  correspond à la circonférence du synchrotron multipliée par le nombre de tours enregistrés) avec  $\beta^2 = v^2/c^2$

Ainsi non seulement le temps est flexible, mais l'espace l'est aussi. Bienvenue dans le monde merveilleux de la physique !

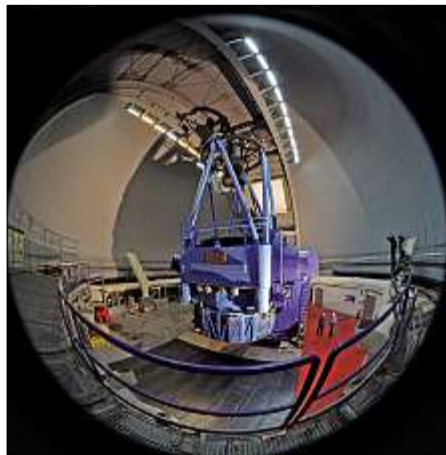
Effectivement, le parcours normal du muon en 2,2 microsecondes devrait être de 14 tours  $\times \pi d^2/4 = 14 \pi \cdot (14)^2/4 = 2\,154$  mètres. Or le nombre de tours mesuré est de 400. Le parcours serait alors de  $410 \cdot \pi \cdot (14)^2/4 = 61\,544$  mètres. C'est impossible compte tenu de la durée de vie du muon. Par conséquent, pas de doute, le muon n'a pu parcourir que 61 544 mètres multiplié par 0,0346 (soit  $1/\gamma$ ) soit effectivement que 2 150 mètres !

### Voyage vers l'étoile $\alpha$ du Centaure. Le paradoxe des jumeaux

C'est la troisième et dernière étape de notre parcours en relativité.

Des astronomes genevois, par des mesures spectroscopiques faites avec le télescope de 3,6 m de diamètre de l'observatoire de la Silla au Chili, ont détecté un très léger balancement de l'étoile Alpha Centauri B sur son orbite, un va-et-vient interprété comme la réponse gravitationnelle de l'étoile à la présence autour d'elle d'une planète très proche, dont la masse serait à peu près équivalente à celle de la Terre. Il faut savoir que ce télescope est l'un des plus performants pour l'étude des exoplanètes.

Maintenant, supposons que nous soyons capables de construire un vaisseau spatial ayant suffisamment d'énergie, qui d'ailleurs ne peut être que



Constellation du Centaure et le télescope de 3,6 m de l'observatoire de La Silla (Chili). L'étoile  $\alpha$  du Centaure est indiquée par le signe « étoile ».



## Parcours relativiste

nucléaire, pour le propulser à une vitesse égale à 80 % de celle de la lumière (0,8c). Dans un tel cas, le point de départ ne pourrait être que la surface de la lune, car l'attraction lunaire est six fois plus faible de celle de la Terre. Je vous laisse cependant imaginer les efforts colossaux pour construire une station de départ permanente viable sur la lune. Admettons que cela puisse être un jour une réalité afin de vérifier l'état exact de cette exoplanète.

Sur notre bonne vieille Terre, dans un siècle, la gouvernance mondiale sera peut-être une réalité. Mais ce n'est que pure conjecture (fig. 3). Admettons qu'elle sélectionne deux jumeaux vrais, un garçon et une fille. Il s'avère que la fille jumelle, allons savoir pourquoi, est préférée pour effectuer la mission d'exploration spatiale vers l'exoplanète de l'étoile  $\alpha$  du Centaure qui n'est éloignée que de 4,36 années lumière. Le jumeau garçon reste à terre. Pour simplifier les calculs et leurs interprétations, la distance choisie est ramenée à 4 années-lumière au lieu de 4,36 à partir de la lune considérée comme notre station orbitale. Il est convenu que le départ sera effectué au 1<sup>er</sup> janvier 2114 et que, chaque 1<sup>er</sup> janvier, les deux jumeaux envoient un puissant signal radio, chacun d'eux étant parfaitement identifié. Les récepteurs – sur terre et dans le vaisseau spatial – ont été dupliqués par sécurité.

Vu de la terre (référentiel), le temps du voyage aller-retour sera de dix années en admettant que les temps d'accélération et de décélération ainsi que le temps de séjour près de l'exoplanète soient négligeables par rapport au temps total du voyage :

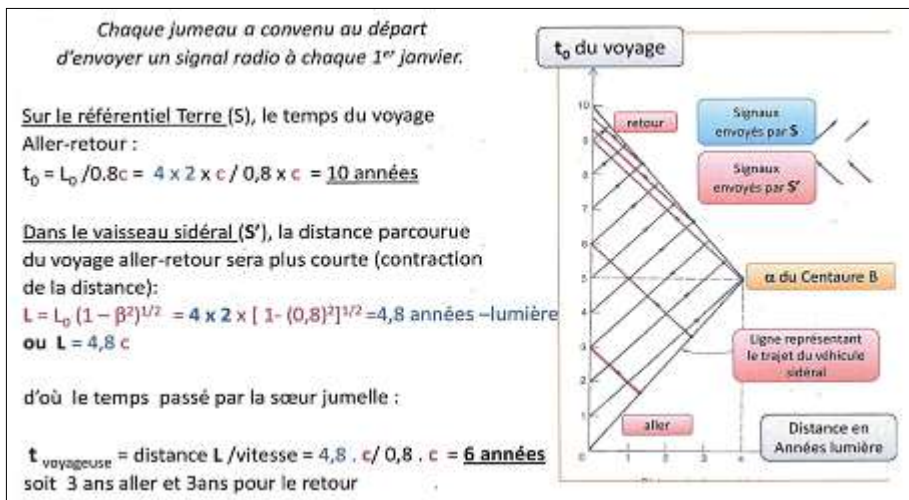


Fig 3 : Diagramme espace-temps du voyage d'un vaisseau spatial vers l'exoplanète de l'étoile  $\alpha$  du Centaure.

Ainsi, lors du retour de la sœur jumelle sur Terre, son temps effectif passé dans l'espace ne sera que de six années. Elle sera donc plus jeune de quatre ans<sup>12</sup>. Ce voyage constituerait pour elle une cure de rajeunissement sans doute efficace quoique fort coûteuse !

Si l'on examine maintenant le diagramme spatio-temporel de ce même voyage, on constate aisément que les signaux radio envoyés chaque 1<sup>er</sup> janvier ne seront reçus par le vaisseau spatial qu'au moment où il prend le chemin du retour (traits bleus). Il recevra bien dix signaux. Par contre, la terre ne recevra que six signaux (traits rouges) en provenance du vaisseau spatial, dont le dernier sera quasi concomitant à son arrivée aux confins de notre ensemble Terre-Lune. Ceci se comprend fort bien lorsque l'on sait que les signaux radio sont des ondes électromagnétiques qui voyagent dans le vide intersidéral à la vitesse de la lumière. Prenons le signal envoyé par la Terre le 1<sup>er</sup> janvier 2115, il ne touchera le vaisseau spatial qu'à son arrivée à proximité de l'étoile  $\alpha$  du Centaure. En effet, le voyage aller du vaisseau a duré trois ans. A cela s'ajoute l'année de voyage du signal à la vitesse de la lumière. Cela fait bien une distance de quatre années-lumière.

Cette façon de présenter la dualité entre espace et temps permet de mieux appréhender la notion de courbure de l'espace.

## En conclusion

Ce « parcours relativiste » en trois étapes n'avait que trois objectifs : d'une part celui de faire toucher du doigt la relativité du temps lorsque des éléments de notre environnement circulent à une vitesse proche de la lumière, d'autre part vérifier expérimentalement la théorie d'Einstein en prenant l'exemple des « super électrons » que sont les muons dont la durée de vie n'excède pas 2,2 microsecondes, enfin mieux comprendre ce fameux paradoxe des jumeaux au cours d'un voyage fictif vers une des plus proches étoiles de la Terre dotée elle aussi d'une planète (appelée aujourd'hui exoplanète).

Cette dilatation du temps et, conjointement, le rétrécissement des distances observés lorsqu'une particule subatomique atteint une vitesse proche de celle de la lumière, certes sont déroutants, mais ne changent pas fondamentalement, en tant qu'humain, notre référentiel commun. En effet, pour voyager à une vitesse proche de celle de la lumière, il faudrait mettre en œuvre des infrastructures et des énergies colossales pour s'échapper de l'attraction terrestre. Au regard des investissements mis en œuvre au CERN pour accélérer des particules élémentaires, il est possible d'imaginer ce qui serait nécessaire

---

12. Si l'on avait pris la distance exacte de 4,36 années-lumière, l'écart de temps observé entre les deux jumeaux serait de  $10,9 - 6,54 = 4,36$ .

pour un véhicule spatial de plusieurs milliers de tonnes. Une telle conjecture est encore hautement improbable. Certes, ce n'est pas totalement impossible, mais notre humanité sera d'abord confrontée à des problèmes vitaux redoutables, tels que l'épuisement des ressources naturelles face à la surpopulation, la raréfaction de l'eau potable et la désertification galopante de certaines régions de notre bonne vieille Terre.

Par ailleurs, la perception cosmologique de notre univers est encore un sujet à débat. Certains disent que notre univers est en expansion constante depuis le big-bang initial, d'autres affirment que notre univers suit des cycles alternés de dilatation et de compression. À notre échelle, cela ne change pas fondamentalement l'avenir de notre humanité.

En fait, il y a un tel écart entre l'évolution de l'*homo sapiens* (environ 100 000 ans) et l'immensité de l'espace en temps et en distance que notre référentiel commun reste lié à nos civilisations. Bien entendu, elles évolueront certainement en tenant compte de nos perceptions nouvelles, mais fondamentalement les fils invisibles et mystérieux qui nous lient, pour qu'amour et vie perdurent sur terre, sont toujours présents. Là, se situe nos espérances.

Toutefois les travaux d'Einstein ont eu un tel impact sur l'évolution des sciences qu'il est toujours intéressant de partager ses concepts pour mieux appréhender les nouvelles pistes de recherche, de réflexions et d'innovations.

## **Annexe**

### ***Relation de Lorentz donnant la dilatation du temps vue du quai par rapport au « TGV » dont la vitesse peut être très proche de celle de la lumière »<sup>13</sup>***

La démonstration qui suit a été imaginée par les deux auteurs cités dans la note 4. Elle a le mérite d'être très pédagogique puisqu'elle fait appel à un concept mathématique simple et très connu, le fameux théorème de Pythagore.

---

13. En 1905, Poincaré pose les équations des transformations de Lorentz, et les présente à l'Académie des sciences de Paris le 5 juin 1905. Ces transformations vérifient l'invariance de Lorentz, achevant le travail d'Hendrik Antoon Lorentz (qui était un correspondant de Poincaré). Ces transformations sont celles qui s'appliquent en relativité restreinte, et on emploie encore aujourd'hui les équations telles que les a écrites Poincaré. Il montre ainsi l'invariance des équations de Maxwell sous l'action de la transformation de Lorentz (cf. [www.fr.wikipedia.org/wiki/Henri\\_Poincaré](http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Poincaré) ).

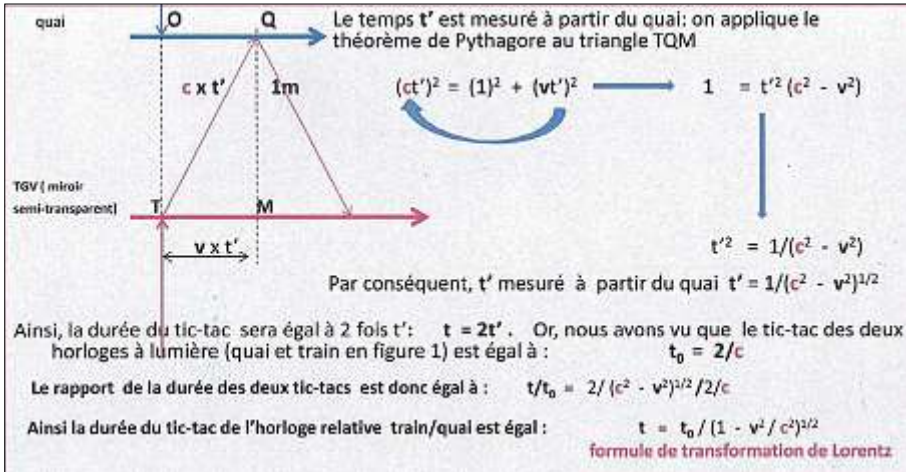


Fig. 4 : Les détails permettant d'établir la dilatation du temps entre le repère fixe (quai) et le repère mobile (train) pouvant atteindre une vitesse proche de celle de la lumière.

Dans le triangle rectangle TPM, le carré de l'hypoténuse  $TQ^2$  est égal à la somme des carrés des deux autres cotés soit,  $TM^2 + PM^2$ . Ainsi, quand le faisceau laser de l'horloge du train arrive au point T du miroir semi-transparent, une partie est réfléchié tandis que l'autre passe à travers. Sachant que, dans le cas présent, nous considérons que la vitesse du train est proche de la lumière, le faisceau laser atteindra le miroir semi-transparent du quai avec un décalage mesurable qui dépend directement de sa vitesse, en fait de la composition des deux vecteurs vitesse (cf. fig. 2 et 3). La vitesse du train est égale à la moitié de la vitesse de la lumière soit  $v = 0,5c$ . Or le miroir du quai comporte un très grand nombre de pixels qui enregistrent tous les événements avec une précision temporelle égale à moins d'une picoseconde<sup>14</sup>. Dans ce cas, le temps  $t'$  mis entre le point O et le point P est mesuré avec une très grande précision. De ce fait, la distance OP est égale à TM (vitesse du train  $v$  multiplié par le temps  $t'$ ) tandis que la distance TP est égale à la vitesse de la lumière  $c$ , multipliée également par ce même temps  $t'$ .

Dans l'encadré ci-dessus (fig. 4), la simple mise en forme de la formule de Pythagore permet d'accéder au temps du tic-tac  $t$  (deux fois  $t'$  soit  $t = 2 \times t'$ ). L'expression du rapport de ce temps  $t$  sur le temps  $t_0$  du tic-tac des deux

14. Une picoseconde est égale à  $10^{-12}$  seconde, c'est-à-dire un millionième de milli-nième de seconde.

## Parcours relativiste

horloges (celle du quai et celle du train vue du quai) permet de calculer la durée du tic-tac connaissant  $t_0$ :

$$t / t_0 = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = 1 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = \gamma$$

Cette expression est celle du mathématicien Hendrik Antoon Lorentz. Un simple examen de celle-ci permet de vérifier que le rapport des carrés de la vitesse du train, sur le carré de la vitesse de la lumière, sera toujours inférieur à 1 puisque la vitesse de la lumière ne peut être dépassée. Par conséquent, la valeur entre parenthèse  $(1 - v^2/c^2)$  le sera aussi. Sa racine carrée, également et de fait, puisque ce terme est au dénominateur, le facteur  $\gamma$  sera toujours supérieur à 1, donc  $t > t_0$ . Il est appelé le facteur de dilatation du temps.

Prenons un peu de temps et regardons les conséquences de cette simple démonstration. Si la vitesse du train est de 100 m/s, le rapport  $v/c$  est très petit. Dans ce cas, le facteur de dilatation du temps est égal à 1,000 000 000 000 033, autant dire inchangé (cf. fig. 2.3).

Par contre, si la vitesse du train est égale à 50 % de celle de la lumière (cf fig. 2.3), l'effet n'est plus négligeable.  $\gamma$  sera égal à 1,15. Ce même facteur de dilatation du temps sera de 2,29 si la vitesse du train est égale à 90 % de la vitesse de la lumière. L'effet est encore plus marqué si la vitesse du train est égale cette fois à 99,94 % de la vitesse de la lumière. Dans ce cas, le facteur  $\gamma$  est très important, soit 28,87. ■

