

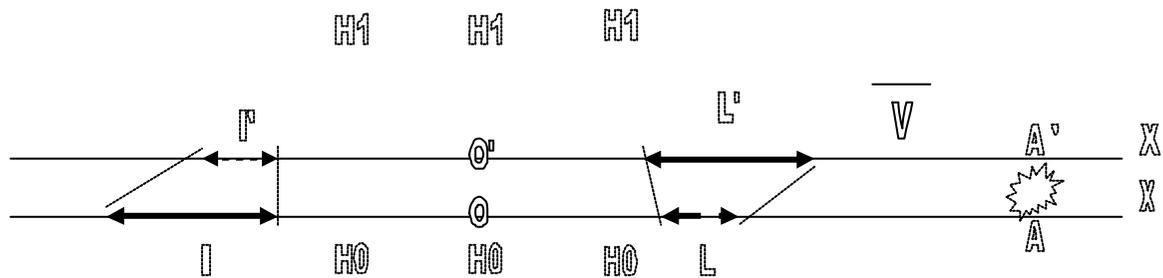
| | |
|---|----|
| Paradoxe de Langevin | 2 |
| <u>1- Rappel du paradoxe :Rappel de Relativité Restreinte</u> | 2 |
| <u>2- 1 Exemple concret : Les jumeaux sont Terence (le sédentaire) et Stella (la voyageuse)</u> | 4 |
| <u>2-2 L'Explication par le Diagramme d'espace Temps</u> | 6 |
| <u>2-3 L'Explication par l'Effet Doppler : Ce que Terence et Stella voient réellement de leurs propres yeux</u> | 8 |
| <u>2-4 Le Paradoxe de Langevin : L'Explication de la "Relativité Générale"</u> | 10 |
| <u>2-5 Les Objections : 2-5-1 L'objection de discontinuité temporelle</u> | 12 |
| <u>2-5-2 : L' Objection de dépendance de la distance.</u> | 16 |
| <u>2-5-3 Trop d'explications: une Méta-Objection</u> | 17 |
| <u>3- Vérifications expérimentales</u> | 17 |
| <u>4- Conclusion</u> | 18 |
| <u>5- Références:</u> | |

Paradoxe de Langevin

1- Rappel du paradoxe : Rappel de Relativité Restreinte

Selon la Relativité Restreinte, un observateur du référentiel X, voit le temps s'écouler plus lentement dans un référentiel X' animé d'une vitesse uniforme par rapport à son propre référentiel galiléen (**il voit les horloges du système en mouvement battre plus lentement que les siennes !**), et en vertu du principe de Relativité X' voit les horloges de X également battre plus lentement!

Les temps et les longueurs sont " dilatés" dans le rapport $(1-v^2/c^2)^{-1/2}$



**On va voir que le concept essentiel au cœur du paradoxe est le temps propre !
(Celui que notre montre nous indique, celui qu'on "vit")**

FAQ 1 : Les contractions d'espace et de temps de la RR sont elles réelles ?

Réponse habituelle : Non !

Réponse plus correcte : Cette question n'a pas de sens en RR : Réelles par rapport à quoi, puisqu'il n'y a pas d'espace absolu ?

FAQ2: Peut on définir la simultanéité entre deux évènements de deux référentiels différents? [Dans un même référentiel, oui, car on a une coordonnée unique de temps]

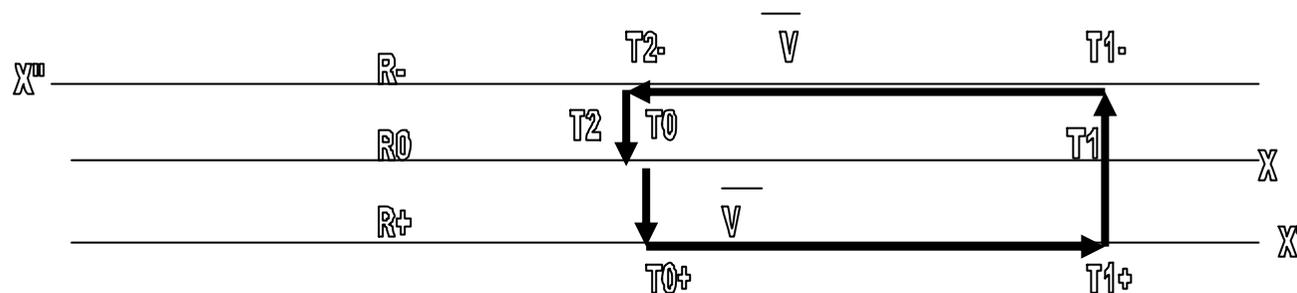
Réponse : La RR définit la simultanéité entre deux points évènements de deux référentiels différents, mais cette simultanéité est relative. Si E_0 de R_0 est simultanée à E_1 de R_1 , lui même simultanée à E_2 de R_2 , en général E_2 n'est pas Simultanée à E_0

FAQ3: N'est ce pas gênant de ne pas pouvoir définir de "contraction absolue" du temps et de l'espace, de ne pas avoir de critère de "simultanéité absolue" ?.

Réponse: Non, cela signifie simplement que la RR suppose que ces critères n'ont aucun caractère physique (ni observable, ni mesurable de façon absolue)

2- En 1911, le physicien français Paul Langevin a imaginé un exemple frappant de l'élasticité du temps.

2- 1 Exemple concret : Les jumeaux sont Terence (le sédentaire) et Stella (la voyageuse): cf ref 4



Malgré la symétrie des équations, et l'apparente symétrie de la situation, la Relativité Restreinte va nous montrer dans ce qui suit, que c'est le voyageur qui vieillit le moins, d'où le paradoxe.

Voici l'itinéraire *selon Terence.*

Début : Stella passe en trombe à côté de moi. Nous synchronisons nos chronomètres.

Trajet aller : Stella croise à presque 99 % de la vitesse de la lumière (le facteur de dilatation de temps est de 7).

Disons que cette partie du voyage dure 7 ans (selon Terence)

Demi tour: Stella met le feu à ses moteurs pendant 1 jour pour inverser le mouvement.

Trajet retour: Stella croise vers la terre pendant 7 années à la même vitesse qu'à l'aller..

Fin (Retour) : Stella passe en trombe devant moi. Selon moi (Terence), 14 ans et un jour se sont écoulés entre le début et le retour. Le chronomètre de Stella n'indique qu'à peine plus que 2 ans*

2-2 L'Explication par le Diagramme d'espace Temps

Minkowski dit, "dorénavant espace seul, et temps seul, sont condamnés se réduire à de simples ombres, et seulement un genre d'union des deux en préservera une Réalité indépendante. (**Minkowski = RR**)

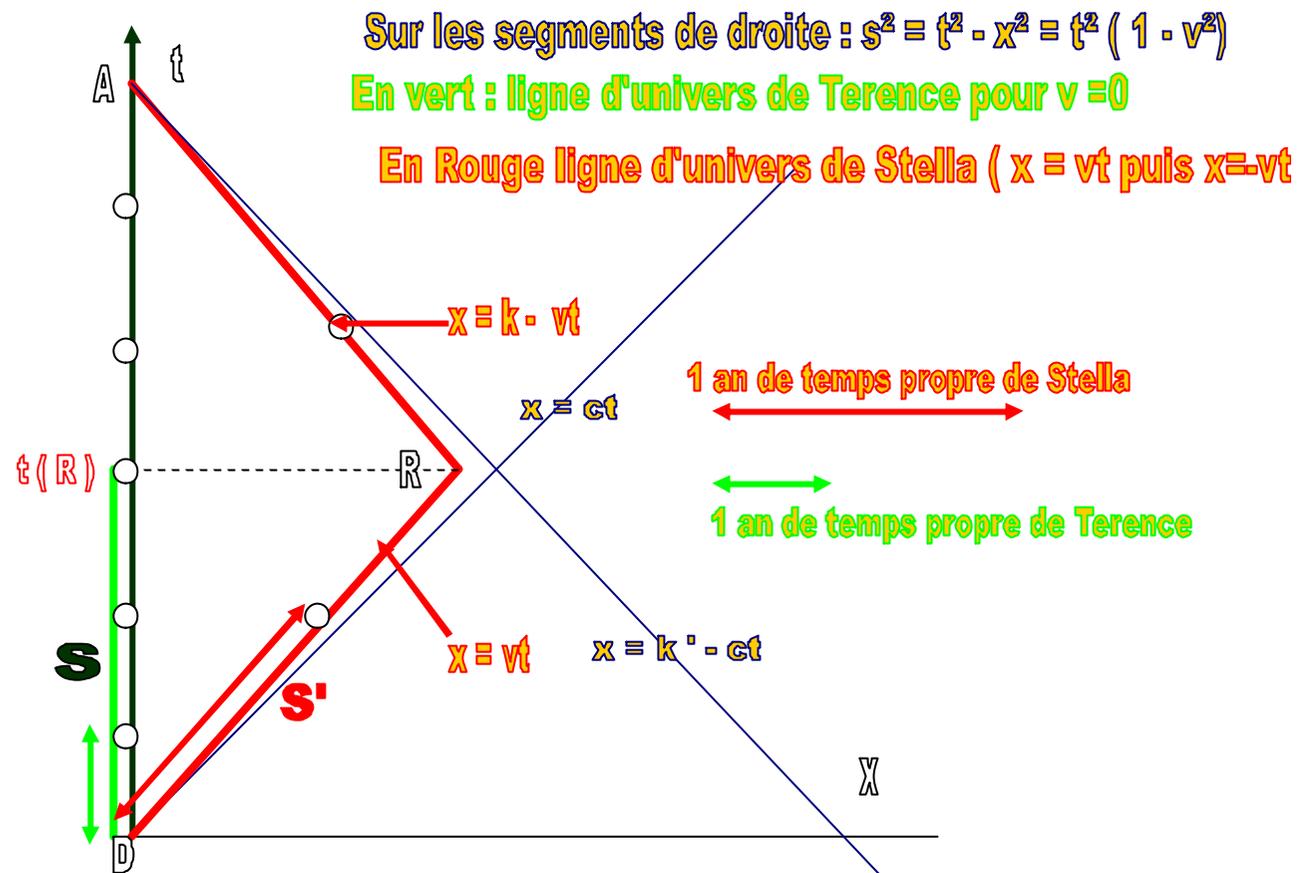
Le concept crucial est le temps propre d'un corps mobile. Choisissons d'abord un référentiel inertiel de référence, disons le référentiel repos de la terre

$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$ donc $t = \int_0^t dt = \int_0^t [1 - v^2(t)]^{1/2} \cdot dt$ avec $v(t) = (dx/dt, dy/dt, dz/dt)$ (on a posé $c=1$) **Conclusion:** la valeur de l'intégrale de Stella ($V > 0$) est inférieure à celle de l'intégrale de Terence ($V = 0$). C.-à-d., son temps propre écoulé est inférieur à celui de Terence.

Comme dans cet exemple, comme la vitesse du référentiel de Stella est constante le rapport des "t" entre Terence et Stella est constant, on peut rendre compte de la métrique de Minkowski, sur une représentation " Euclidienne" simplement en mesurant les longueurs des lignes d'univers de Terence et Stella (leurs temps propres) par des unités différentes (dont le rapport est égal à $\sqrt{1 - v^2/c^2}$: coordonnées curvilignes)

Si nous évaluons " τ " qui vaut:
 $\tau = \sqrt{1 - v^2/c^2} \cdot t$, nous voyons qu'il est proportionnel à t , avec deux coefficients différents $f(v)$ pour les deux lignes d'univers.

Ces lignes d'univers étant elles mêmes représentées par des droites proportionnelles à t , on peut représenter le temps propre écoulé sur ces lignes d'univers, à la bonne échelle. Longueurs différentes pour l'unité de temps propre.



Voilà toute l'histoire! Nous évaluons une intégrale de chemin le long de deux chemins différents, et nous obtenons deux résultats différents (Calcul).

2-3 L'Explication par l'Effet Doppler : Faisons une expérience, ce que Terence et Stella voient réellement de leurs propres yeux,

Equipons les des télescopes très puissants, ainsi chaque jumeau peut **observer** l'autre et son horloge qui émettra des éclairs toutes les secondes pendant tout le voyage.

- Sur la Trajet aller, Terence voit approximativement un éclair toutes les 14 secondes sur l'horloge de Stella.

- Sur la Trajet retour, il voit l'horloge de Stella clignoter à environ 14 éclairs par seconde.

Stella voit le même comportement vis à vis de l'horloge de Terence.

Les facteurs d'effet Doppler (1/14 et 14/1) sont issus de la formule relativiste.

Réponse: Examinons le diagramme de la figure 2:

- Sur le diagramme de gauche, Terence "voit" Stella vieillie de 2 mois faire demi tour, au bout 13 ans 10 mois de son temps propre, il va la "voir" vieillir ensuite rapidement pendant les 2 mois suivants de son temps propre, mais cela survient trop tard.

- Sur le diagramme de droite lorsque Stella fait son demi tour, au bout d'un an de son temps propre, elle "voit" Terence vieilli de 2 mois, elle va le "voir" vieillir rapidement de 13 ans 10 mois pendant son retour qui dure un an de son temps propre.

Représentation des rayons lumineux sur le diagramme d'espace temps

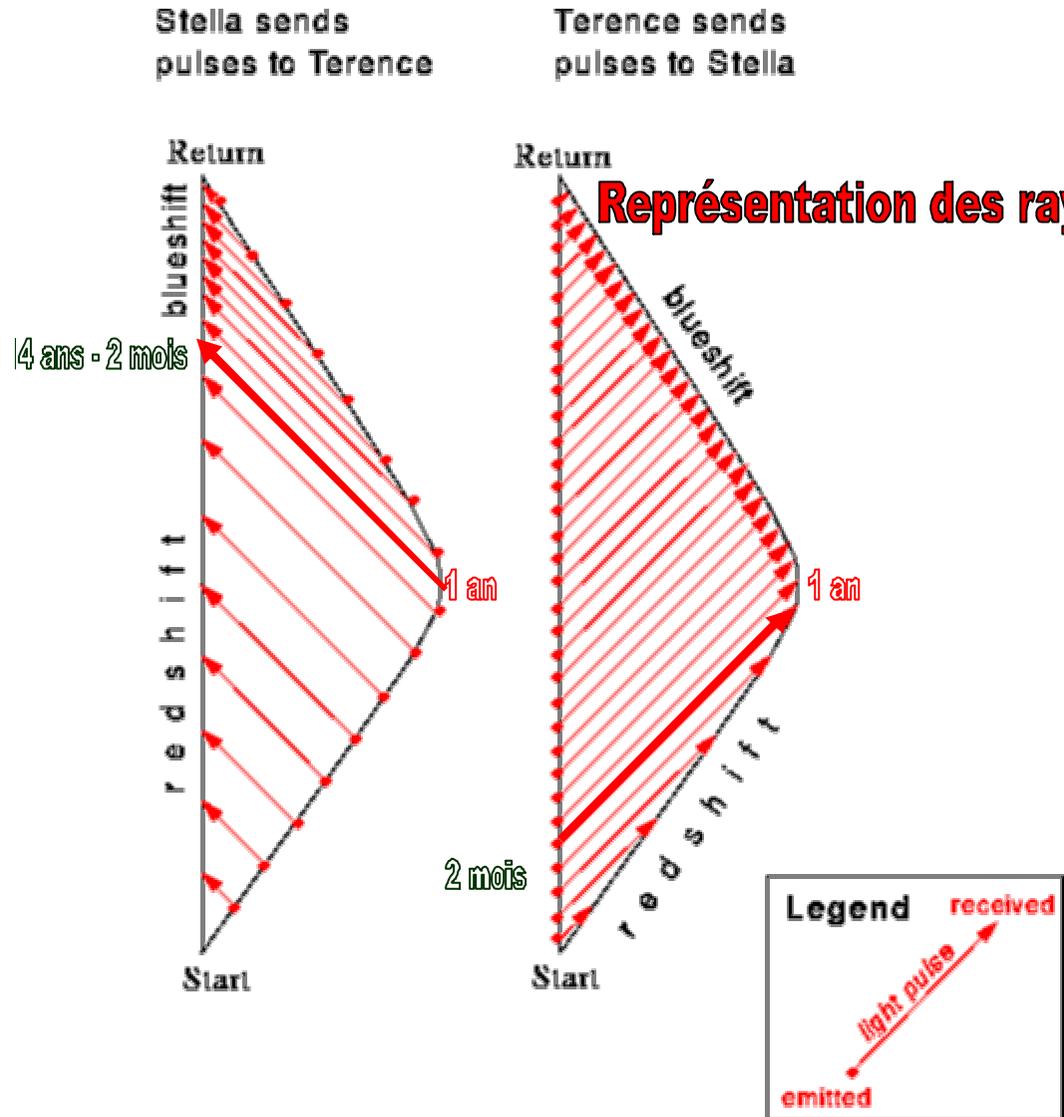


Figure 2: The Doppler Shift Explanation

2-4 Le Paradoxe de Langevin : L'Explication de la "Relativité Générale"

- **Libre choix des référentiels de référence:** Vous pouvez décrire la physique d'une situation depuis n'importe quel référentiel à votre guise, mais quelques référentiels exigent l'introduction de champs qui n'apparaissent pas dans d'autres référentiels. Nous les appellerons "champs de pseudo-force" ou même de "gravitation".

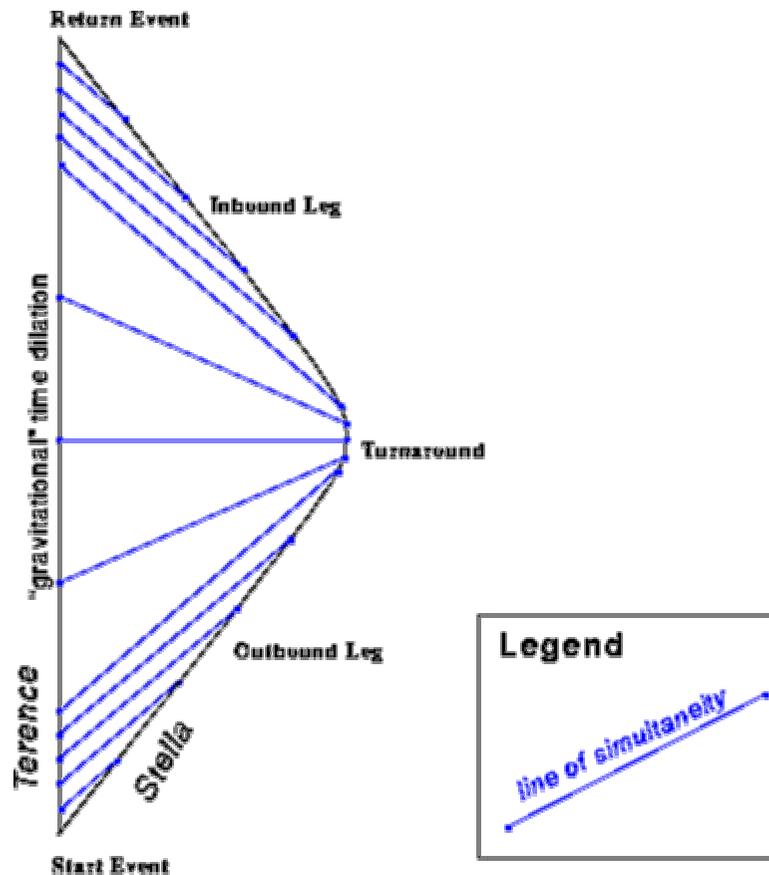
- **Dilatation uniforme "gravitationnelle" de temps:** Si vous avez deux horloges identiques, l'une au fond d'un puits de potentiel "de gravitation" uniforme et on place l'autre plus haut, l'horloge inférieure bat plus lentement que l'horloge supérieure.

Sélectionnons le référentiel de Stella , et déclarons le au repos, tout le temps!

- **Quand elle met à feu ses moteurs pour le demi tour, elle "constate" qu'un champ "de gravitation" uniforme inonde soudainement l'univers: le champ compense exactement la force de ses moteurs, ainsi elle reste immobile.**

Pas pour Terence. Le champ cause son accélération, (du point de vue de Stella qui le voyait s'éloigner régulièrement et qui voit maintenant sa vitesse d'éloignement ralentir puis s'inverser et qui voit Terence se rapprocher en tombant vers elle en chute libre, mais Terence ne sent rien puisqu'il est en chute libre. Il y a une énorme différence de potentiel entre lui et Stella: rappelez-vous, il est des années-lumière de Stella.

- Ainsi par la dilatation uniforme "gravitationnelle" du temps, **il "vieillit" de plusieurs années pendant le demi tour de Stella (cf fig 3).**



Représentation sur le diagramme d'espace temps

Figure 3: The "GR" explanation

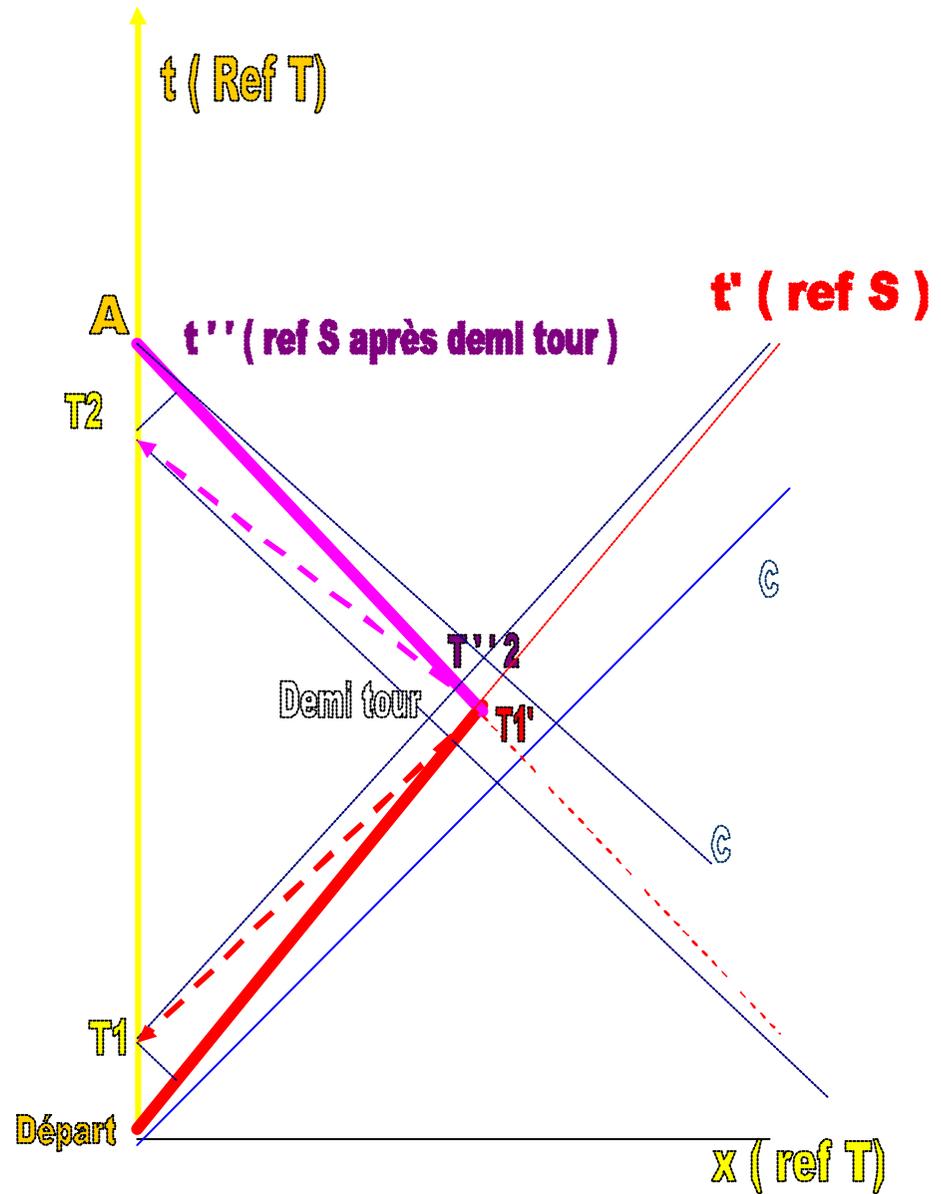
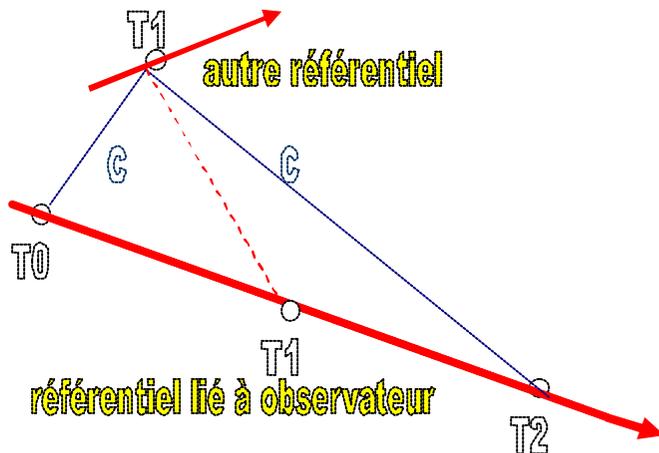
Le diagramme relatif à l'explication par la relativité générale, est complété par des lignes de simultanéité (en bleu) au lieu d'impulsions lumineuses. Ces lignes représentent le lieu géométrique des événements qui se déroulent simultanément selon Stella .On peut voir comment les lignes sont bien groupées sur la ligne d'Univers de Stella et dispersées sur la ligne d'Univers de Terence. Ceci est une représentation graphique de la dilatation gravitationnelle du temps.

Diagramme de synthèse avec les 3 référentiels montrant la simultanéité

Représentation en géométrie affine

T1 simultané à T'1
 T'1 simultané à T''2
 T''2 simultané à T'2

Simultanéité en géométrie affine



2-5-1 L'objection de discontinuité temporelle

Supposons le demi tour instantané; la Relativité impose une limite supérieure aux vitesses, mais pas aux accélérations.

- Un demi tour instantané est un cas limite d'un demi tour court, donc la théorie devrait traiter ce cas.

- Trajet aller, Terence vieillit de moins de 2 mois selon Stella (12 mois de Stella, Facteur de dilatation temporel = 7).

- Trajet retour, Terence vieillit pareil, car les mêmes calculs de Stella s'appliquent aussi.

Si le demi tour est instantané, il semblerait donc que Terence n'ait vieilli que de 4 mois à peine. Pourtant on prétend que Terence a vieilli de 14 ans quand Stella le recroise au retour ! Où sont donc passés les années manquantes ?

L'explication par l'effet Doppler répond à cet argument. Stella voit (via son télescope) Terence vieillir très lentement sur le trajet aller , mais prendre pratiquement 14 ans sur son trajet retour. Pas de discontinuité temporelle !

Certes elle calcule quelque chose de différent en tenant compte de l'effet Doppler et de la vitesse finie de la lumière. Ces calculs sont valables pour des référentiels inertiels.

En fait pour Stella, elle obtient 2 mois pour le référentiel correspondant au le trajet aller et 2 mois sur le référentiel correspondant au trajet retour (cf ci-dessus) , et pour obtenir 4 mois elle doit additionner des quantités mesurées dans deux référentiels différents (elle a changé "instantanément" de référentiel inertiel à mi course).

- **Mais des référentiels inertiels différents ont des critères différents de simultanéité.** Le référentiel "trajet aller" dit : "Au moment où Stella fait son demi tour, **l'horloge de Terence marque environ 2 mois depuis le départ**".

Le référentiel du trajet retour dit: " Au moment où Stella fait son demi tour, **l'horloge de Terence marque environ 13 ans et 10 mois.**

- **La prétendue discontinuité n'est autre qu'une erreur de décompte des temps, liée au saut de référentiel.**

L'explication par le **diagramme d'espace temps** renvoie à la même solution.

Quant à **l'explication par la "RG"** l'objection de la "discontinuité temporelle", nous invite à considérer la limite d'un demi tour instantané.

Mais dans cette limite **le champ gravitationnel devient infini entraînant une dilatation temporelle infinie.** Ainsi Terence **vieillirait de plusieurs années instantanément** , ce qui est physiquement irréaliste, comme un demi tour instantané.

.

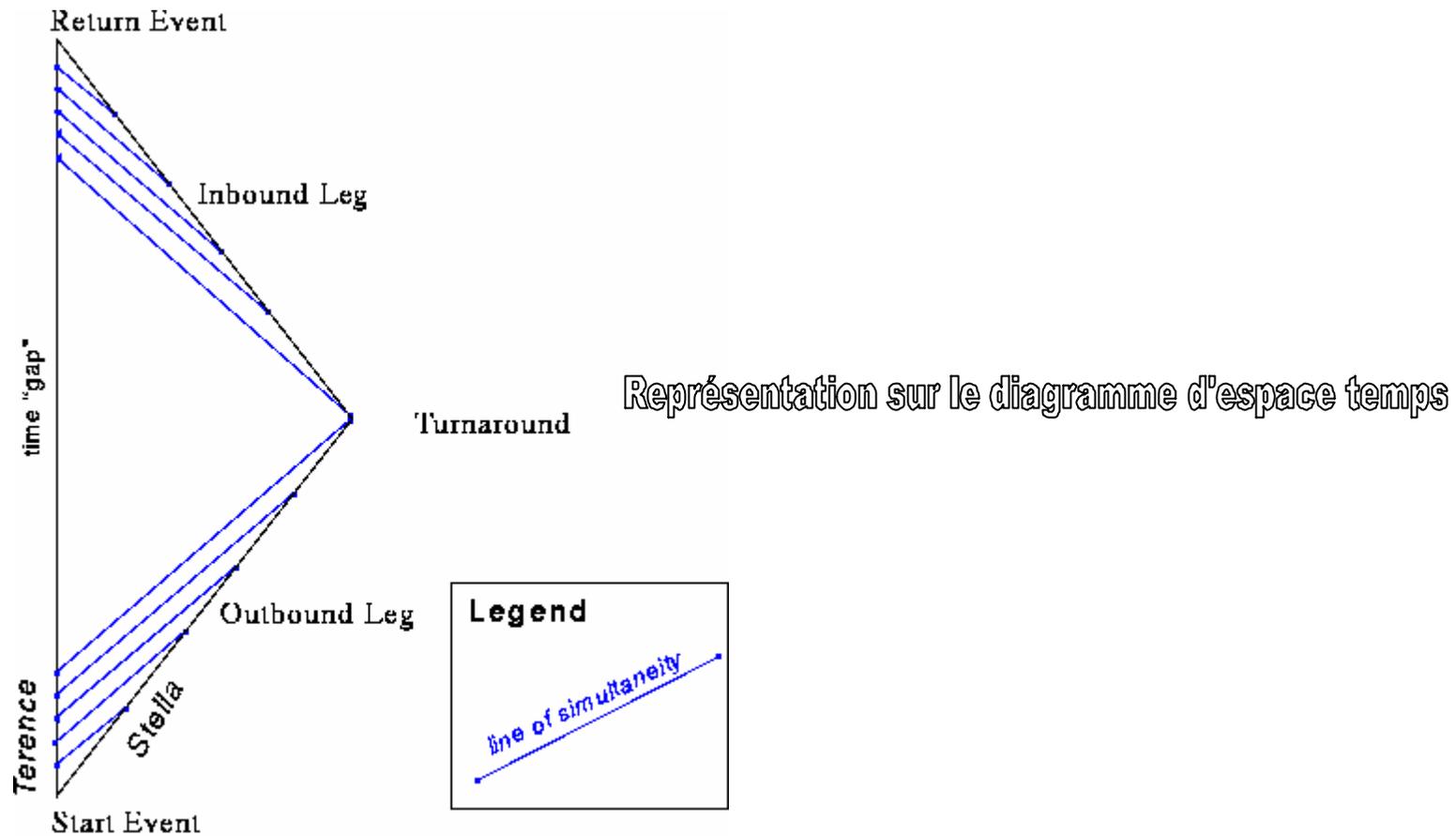


Figure 4: The Time Gap Objection

Ici nous avons supposé le demi tour instantané. Sur le trajet Aller Stella utilise un référentiel inertiel de référence et la même notion de simultanéité que précédemment alors que sur le trajet retour elle commute vers un autre référentiel. La discontinuité temporelle (la partie de la ligne d'Univers de Terence dépourvue de lignes bleues) est une conséquence de cette commutation brutale.

2-5-2 : L' Objection de dépendance de la distance.

Si Stella fait, dans les mêmes conditions, **un voyage 2 fois plus long, prenant 4 ans de son temps propre**, il s'en écoulera 28 ans selon Terence.

Elle effectue le même demi tour, qui prend le même temps propre (15 heures).

Alors quand Stella et Terence fêteront leurs retrouvailles fugaces, Terence aura vieilli de 28 ans (plus un jour). Stella décompte le vieillissement de Terence comme suit: 2/7 d'années sur le trajet aller, 2/7 d'année sur le trajet retour:

Terence s'est pris, cette fois ci, un coup de vieux de plus de 27 ans pendant le demi tour, soit environ deux fois plus que dans notre exemple standard, alors que Stella a opéré le demi tour dans le même temps, ce que Terence confirme.

La Solution est que la façon dont Terence vieillit, n'est pas quelque chose que l'on peut observer directement en RR (pas de simultanéité absolue).

L'explication par l'effet Doppler s'appuie sur ce que Terence et Stella voient vraiment avec leurs télescopes, ce qui élude la difficulté.

Le décompte de Stella est un décompte qui dépend du référentiel inertiel, et pendant tout le demi tour elle change, de façon continue de référentiel inertiel.

Dans l'explication de la RG, pas de mystère, la dilation temporelle dépend de la différence de potentiel "gravitationnel", qui dépend de la distance (dans un champ uniforme).

2-5-3 Trop d'explications: une Méta-Objection

Pourquoi tant d'explications ? Les tenants de la Relativité chercheraient ils à noyer le poisson?

La théorie nous dit : Prenez le référentiel qui vous plait pour décrire vos résultats. Cela n'est pas surprenant qu'une explication se décline en plusieurs versions.

La plupart des physiciens considèrent l'explication par le diagramme d'espace temps comme l'explication fondamentale.

Sa nature géométrique fournit une trame Universelle qui sert de support aux explications apparemment différentes et montre quelles ne sont que différents aspects de la même.

Moralité : Un seul territoire, plusieurs cartes.

3- Vérifications expérimentales

L'expérience de Langevin a été vérifiée avec des particules élémentaires appelées muons. Au CERN, on est capable d'accélérer un muon jusqu'à ce qu'il atteigne la vitesse de $0,9994 c$. Or, le muon est une particule instable qui se désintègre au bout de $1,5$ microseconde ; c'est son temps de vie propre. Or, lorsqu'on mesure son temps de vie apparent (dans le référentiel du laboratoire) on trouve 44 microsecondes, soit 30 fois plus - en parfait accord avec la Relativité restreinte.

Horloge voyageuse qui à pris du retard : Cela ressemble plus au cas indiqué (le cas est complexe car il faut tenir compte de nombreux effets, gravitation, accélération, cinématique)

4- Conclusion

On a vu que le paradoxe, lié au fait que l'apparente symétrie des équations et du phénomène décrit n'entraîne pas des vieillissements équivalents, est brisé par le demi tour du voyageur. Alors la signification de ce "paradoxe" est que dans des conditions différentes ou dans des régions différentes de l'espace temps, **le temps propre des observateurs peut se dérouler différemment (se désynchroniser).**

Le temps propre de chaque observateur est "immuable" puisqu'il est mesuré par une horloge qui lui est associée (qui contrôle aussi son rythme biologique).

Dans les conditions que nous connaissons, tous les observateurs sont soumis aux (presque) mêmes conditions et que l'écart est infinitésimal, ce qui nous laisse à penser que temps propre est le même pour tous.

Pour pouvoir constater cette différence il faut partir d'une situation, où les temps propres sont "synchronisés" et disymétriser la situation et la resymétriser plus tard pour que le constat soit évident. Ceci nécessite des accélérations.

Pour autant, celui qui voyage ne vit pas plus vieux (il n'a pas vécu 14 ans et vieilli de 2 ans, il a vécu 2 ans, et vieilli de 2 ans pendant que l'autre vivait 14 ans et vieillissait de 14 ans). **Il ne s'agit donc pas d'une fontaine de Jouvence, on peut par contre le considérer comme un saut dans le futur d'une civilisation (sans retour).**