EINSTEIN aujourd'hui: l'ESPACE-TEMPS a un siècle *

par **Jacques Bros**, physicien théoricien (Saclay)

Une double commémoration pour Albert Einstein, figure mythique de la physique moderne: 1) Einstein est mort en 1955. 2) L'année 1905 est marquée par 4 articles fondamentaux d'"Albert Einstein" (âgé de 26 ans) qui vont révolutionner notre conception du monde physique, à la fois son cadre ("espace-temps de la relativité restreinte"), son contenu (preuve de la structure atomique de la matière et particules de lumière ou *"photons"*) et les lois qui régissent les échanges d'énergie (équivalence masse-énergie $E = mc^2$ intégrée à l'espace-temps).

Il s'agit d'un renouveau (ou "révolution") de première grandeur dans l'aventure humaine de la connaissance scientifique. Le questionnement sur la "réalité physique " du monde qui nous entoure et dont notre corps fait partie, et sur les lois qui la régissent, telle est la grande aventure scientifique de l'humanité. Aventure d'une quête de connaissance purement désintéressée, et dont est bannie la fameuse question "A quoi ça sert?"...

L'espace-temps dit "relativiste" est un des piliers de la conception moderne de la réalité physique, valable de la physique des particules (10^{-15} m) jusqu'aux échelles cosmologiques (10^{26} m).

Avant 1905: Espace et temps sont idéalisés comme des *"cadres absolus"* de nos perceptions, indépendants l'un de l'autre:

L'espace a donné lieu (depuis plus de 2000 ans) a une description mathématique: c'est la *"géométrie euclidienne"*. Le plan et ses figures simples: droites, cercles, coniques..., la sphère: découverte bouleversante pour nos ancêtres de la *rotondité de la terre*. Une illustration exemplaire du *rôle des mathématiques dans la compréhension de la réalité physique*: le calcul du rayon terrestre par Eratosthène.

Mesures de distances (règles graduées). La notion de "*distance*" est *un concept absolu*, contrairement à la *perspective* qui est un *concept relatif à l'observateur*. La représentation géométrique de l'espace sous forme de *cartes* nous est parfaitement familière (bien qu'il y ait déjà là une abstraction: échelle, divers types de coordonnées etc...).

Mesures de temps (phénomènes périodiques: horloges)

La correspondance entre nombres et figures (algèbre et géométrie) et l'apport fondamental de Descartes: les axes de coordonnées (rôle fondamental dans la construction de cartes)

Une *représentation géométrique incorporant l'évolution temporelle (repos et mouvement):* **L'espace-temps "galiléen"**, un "espace" dont les points sont des *"évènements"* $X = (\vec{x}, t)$ (le concept d'une "carte des évènements" dans une certaine "région spatiotemporelle" de l'univers) .

Remarque à propos de la dimension (d= 3+1 =4) et du caractère abstrait de cet "espace" (l'espace-temps): la perception géométrique (ordinaire) est restaurée si l'on se restreint à des mouvements le long d'une droite (d =1+1 =2) ou dans un plan (d= 2+1 =3)

---

* *Conférence donnée à Saclay, le 18/09/2005 (journée "porte ouverte") et à Orsay, le 20/10/2005 dans le cadre de l'association ALCA (Langue et Culture Allemandes).*

"Lignes d'univers" d'objets matériels ponctuels au repos ou en mouvement: droites et mouvements uniformes (principe d'inertie = absence de forces d'interaction); *loi de composition des vitesses* pour tous les objets en mouvement (exemple: passager marchant à 5 km/h dans un train roulant à 100 km/h; sa vitesse par rapport à la terre: 100 +5 ou 100-5 km/h). Les mouvements accélérés sont produits par des forces d'interaction (loi de Newton).

La matière à l'échelle de l'infiniment petit: continu ou discontinu ? L'hypothèse atomique: existence d'atomes et d'électrons se comportant comme des objets "presque" ponctuels en interactions mutuelles.

La lumière a une vitesse de propagation (Roemer 1685): $c =$ environ $300.000 km/s$ dans le vide. Le problème de l'*éther*, milieu hypothétique au "repos absolu" dans lequel se propageraient les ondes de lumière.

Crise de la physique aboutissant à la révolution conceptuelle de 1905: *La lumière n'obéit pas à la loi de composition des vitesses* (expériences de Michelson et Morley en 1887). La vitesse c est une constante universelle, indépendante de la direction d'observation ainsi que des mouvements (uniformes) de la source lumineuse et de l'observateur. Impossibilité de mesurer une vitesse par rapport à l'éther, lequel apparait donc comme un concept physique inutile, puisqu'inobservable.

Nouvelle conception de l'espace-temps et structure en particules de la matière et de la lumière issues des travaux d'Einstein de 1905 et valables aujourd'hui

1- Principes de base pour une reconstruction de l'espace-temps

Partant du postulat de base (vérifié expérimentalement) du caractère **universel** de la vitesse de la lumière, nécessité de modifier la représentation galiléenne de l'espace-temps, avec les principes suivants

i) Seule garde un caractère *absolu* dans l'espace-temps *la notion d'évènement*: point X de coordonneées $(\vec{x}, t)$ (resp, $(\vec{x}_v, t_v)$) par rapport à un observateur "immobile" $\mathcal{O}_0$ (resp. un observateur $\mathcal{O}_v$ "en mouvement uniforme" de vitesse v). Les coordonnées d'un évènement (espace et temps) n'ont qu'une valeur *relative* à l'observateur.

ii) l'universalité (pour tous les observateurs $\mathcal{O}_v$) de la vitesse de la lumière c implique une relation de type absolu entre les évènements (X, Y) tels qu'un rayon lumineux issu de X puisse parvenir en Y (ou l'inverse). Cette relation doit s'inscrire dans la structure géométrique elle-même de l'espace-temps: c'est l'*existence d'un "cône de lumière absolu" C_X de sommet X issu de chaque évènement X*. Tous les évènements Y appartenant à C_X sont dits *"en relation causale via la lumière"* avec X; C_X est formé de deux cônes convexes opposés C_X^+ et C_X^- distinguant les évènements Y dans le futur de ceux dans le passé de X.

iii) *Futur, passé et région acausale d'un évènement*

Tous les mouvements uniformes passant par un évènement X sont représentés par des droites Δ *intérieures au cône de lumière C_X* de sommet X.

L'intérieur du cône de lumière $C_O \doteq C$ de sommet l'origine O (évènement "ici et maintenant" choisi une fois pour toutes) se décompose en deux cônes pleins:

a) Le cône V_+ contient tous les évènements X dans le "futur absolu" de O: OX est une ligne d'univers d'un mouvement uniforme possible allant de O à X et on notera aussi cette relation $X > O$: c'est une *"relation d'ordre"* dans l'espace-temps (si $X > Y$ et $Y > Z$, alors $X > Z$).

b) Le cône V_- contient tous les évènements X dans le "passé absolu" de O (OX est une ligne d'univers partant de X et aboutissant à O).

Les lignes de lumière génératrices de C forment les frontières respectives C^+ et C^- de V_+ et V_-. Les évènements dans la réunion $V_+ \cup V_-$ sont dits *"en relation causale via la matière"* avec O. Toute la région extérieure à C contient les évènements X *"en relation acausale"* avec O (aucun signal matériel ou lumineux ne peut se propager entre O et X).

iv) On devra retrouver *avec une excellente approximation* la représentation galiléenne, en particulier la loi de composition des vitesses pour des observateurs animés de faibles vitesses relatives et observant des mouvements de faibles vitesses ("faible" signifiant "petit par rapport à c"); également la géométrie euclidienne de l'espace doit être préservée dans un sens satisfaisant pour chaque observateur $\mathcal{O}_v$.

Remarques à propos de ces principes:

1) La réduction de la réalité physique à des "évènements" et à leurs relations mutuelles (par exemple Y est sur le cône de lumière de sommet X, Y est en relation causale -dans le futur ou le passé- ou acausale avec X) garde un sens fondamental dans toute la physique contemporaine dite "quantique" (voir paragraphe 3).

2) L'intégration de la lumière à la géométrie de l'espace-temps n'avait pas lieu d'être dans le cadre galiléen (vitesses quelconque $c + v$, $c - v$ etc$\cdots$ des rayons lumineux).

3) Une révolution conceptuelle de la physique ne fait pas "table rase du passé": elle intègre les connaissances de la période précédente à titre d'"excellentes approximations" dans des conditions d'observation particulières, et se justifie par l'obtention d'un cadre d'explication de phénomènes plus généraux.

2-L'espace-temps reconstruit: espace-temps de Minkowski, ou "espace-temps de la relativité restreinte"

Issu des travaux d'Einstein de 1905, et basé sur les principes précédents, l'espace-temps dit "de la relativité restreinte" va être décrit de façon parfaitement claire géométriquement en 1908 par H. Minkowski (l'ancien professeur de mathématiques d'Einstein à Zürich !).

Vérité remarquable: tout au long du vingtième siècle, cette géométrie s'est avérée représenter la réalité physique sur des échelles de longueurs et de temps qui vont de celles de la physique des particules (intégrant les propriétés de la *physique quantique* dans l'"infiniment petit") à celles de l'astronomie (à condition d'y intégrer une notion de "courbure" liée à la *relativité générale* dans l'"infiniment grand"), soit une variation de facteur d'échelle de l'ordre de 10^{40}. En d'autres termes, *la lumière structure l'espace-temps à travers toutes ces échelles de distance et de temps.*

Propriétés géométriques fondamentales:

a) **Relativité de la simultanéité:** Étant donné un observateur $\mathcal{O}_\Delta$ de ligne d'univers Δ issue de O, tous les évènements interprétés par $\mathcal{O}_\Delta$ comme *simultanés à un évènement X de Δ et spatialement alignés* sont représentés par une droite Δ'_X passant par X et obéissant à la *"règle du milieu"* suivante: soit L_1 et L_2 les lignes de lumière issues de O dans le plan déterminé par Δ et Δ'_X, M_1 et M_2 les points d'intersection de Δ'_X avec (respectivement) L_1 et L_2. Alors X est le milieu de M_1M_2.

En conclusion: la parallèle Δ' à Δ'_X menée par O indique une *direction de simultanéité associée à $\mathcal{O}_\Delta$*: c'est une droite *appartenant à la région acausale de O* qui dépend de Δ. *La simultanéité des évènements est une notion qui dépend de l'observateur.*

La paire (Δ, Δ') fournit un système d'axes de coordonnées (obliques) (x_Δ, t_Δ) pour l'observateur $\mathcal{O}_\Delta$ et la direction d'espace associée Δ'. Les équations des lignes de lumière L_1 et L_2 dans ce système sont par construction: $x_\Delta = \pm ct_\Delta$.

Remarque L'hypothèse d'un mouvement matériel *"supraluminal"* (de vitesse $v > c$) pour un observateur donné $\mathcal{O}_\Delta$, mouvement dont la ligne d'univers Δ'_1 serait dans la région acausale de O, conduit à un paradoxe du type suivant: il existe un observateur pour lequel ce mouvement aurait une vitesse infinie (celui de ligne d'univers Δ_1 admettant Δ'_1 comme direction de simultanéité), et des observateurs (en nombre infini) pour lesquels ce mouvement remonterait le temps.... De tels mouvements matériels (et a fortiori des observateurs subissant ces mouvements...) sont hors du champ des phénomènes physiques observables...

b) **la (pseudo-)distance minkowskienne:**

Une propriété impressionnante de l'espace-temps relativiste est l'existence d'une notion de *"distance"* $d(X, Y)$ entre deux évènements quelconque X et Y de notre univers: elle est comparable à la distance entre deux points de l'espace euclidien, mais satisfait à une inégalité triangulaire différente, dont l'interprétation physique va être bouleversante....

Cette distance, dite "minkowskienne", a une interprétation:

-*temporelle* (mesurable par une horloge) si X et Y sont en relation causale via la matière: c'est le temps mesuré par un observateur en mouvement uniforme de X à Y (ou de Y à X),

-*spatiale* (mesurable par une règle graduée et coïncidant avec la distance euclidienne ordinaire) si X et Y sont en relation acausale,

-Enfin $d(X, Y)$ s'annule non seulement si $X = Y$ mais dès que X et Y sont en relation causale via la lumière.

La façon la plus concrète possible de comprendre cette notion de distance consiste à décrire ce que sont les *lignes d'équidistance d'un point-évènement*, de même que dans le plan euclidien les lignes d'équidistance d'un point O sont tous les cercles de centre O.

Les courbes anniversaires (future et passée) de l'évènement O

On considère tous les observateurs $\mathcal{O}_\Delta$ partant de O (à bord de "fusées à grande vitesse") le long d'une même direction et en mouvement uniforme avec toutes les vitesses possibles vers la droite ou vers la gauche ($v > 0$ ou $v < 0$); l'une reste au repos ($v = 0$). Tous les observateurs sont munis d'horloges identiques et de "cartes de l'espace-temps" également identiques. Chaque observateur (de ligne d'univers Δ_v) est convié à célébrer l'anniversaire de son départ en situant cet évènement X_v sur la carte de l'espace-temps, ainsi que sa ligne de simultanéité correspondante Δ'_{X_v}. Le résultat d'ensemble est le suivant:

Tous les évènements anniversaires X_v appartiennent à une courbe H_O^+ telle que la tangente à H au point X_v soit la droite Δ'_{X_v}. Il résulte alors de la "règle du milieu" que *la courbe H_O^+ est une branche d'hyperbole dont les asymptotes sont les lignes de lumière L_1, L_2*. Pour chacun des observateurs $\mathcal{O}_{\Delta_v}$, H_O^+ est représentée dans son système de coordonnées (x_v, t_v) par l'équation $(t_v)^2 - \left(\frac{x_v}{c}\right)^2 = 1$, avec $t_v > 0$. Nous appellerons H_O^+ la *courbe anniversaire future de l'évènement O*.

De même la branche d'hyperbole H_O^- d'équation $(t_v)^2 - \left(\frac{x_v}{c}\right)^2 = 1$, avec $t_v < 0$. représentant l'ensemble des événements X_v du passé de O tels qu'un mouvement uniforme de vitesse v transporte un observateur de X_v à O pendant une durée de un an (à sa propre horloge) est la *courbe anniversaire passée de l'évènement O*.

Pour chaque observateur, la durée observée sur sa *propre* horloge s'appelle *"le temps propre"*.

Remarque ces courbes anniversaires sont l'analogue du cercle de rayon unité de centre O dans le plan euclidien (cercle d'équation $x^2 + y^2 = 1$). L'interprétation "spatiale" de cette courbe est maintenant remplacée par une interprétation "temporelle". Tous les points (évènements) X des courbes anniversaires H_O^+ et H_O^- sont par définition *à la distance unité* de O: $d(O, X)$ $(= d(X, O)) = 1$.

Distance $d(X, Y)$ de X à Y = durée en temps propre pour l'observateur en mouvement uniforme (ligne d'univers droite) de X à Y.

Les courbes d'équidistance temporelles (futures et passées) de O Ce sont toutes les branches d'hyperboles $H_O^+(\tau)$ et $H_O^-(\tau)$ d'équations $(t_v)^2 - \left(\frac{x_v}{c}\right)^2 = \tau^2$, avec respectivement $t_v > 0$ et $t_v < 0$.

On définirait de même:
Les courbes d'équidistance spatiales de O Ce sont toutes les hyperboles $H_O(\delta)$ d'équation $\left(\frac{x_v}{c}\right)^2 - (t_v)^2 = \delta^2$.

L'inégalité triangulaire inversée et les "jumeaux de Langevin"

Soit trois mouvements uniformes dont les lignes d'univers sont les segments de droite OX, OY, YX, avec $X > Y > O$. Par exemple OX peut être pris comme au repos par rapport à la terre. Alors on a:

$$d(O, X) > d(O, Y) + d(Y, X).$$

Illustration sur la figure: $d(O,Y) = d(Y,X) = 1$ année.
Le voyage du "jumeau voyageur" a duré (pour lui) deux ans. Mais...
$d(O,X) = d(O,A) + d(A,B) + d(B,X) = 1 + d(A,B) + 1 > 2$ années.
L'attente du "jumeau sédentaire" a duré (pour lui) deux ans PLUS $d(A,B)$.

3- L'espace-temps relativiste dans "l'infiniment petit". Photons et particules de matière en mouvement uniforme: $E = mc^2$ et l'espace minkowskien des énergies-impulsions. Le traitement quantique des particules.

Dans l'infiniment petit, la géométrie minkowskienne de l'espace-temps est reliée de façon intime avec

a) le principe d'équivalence masse-énergie ($E = mc^2$) et les bilans de conservation d'énergie et d'impulsion dans les collisions impliquant des particules de matière et de lumière (avec creations ou désintégrations possibles de particules).

b) le traitement *quantique* des particules (autre révolution conceptuelle de la physique du vingtième siècle).

a) Il existe une "*cartographie des états de particule*" dans un cadre géométrique qui est similaire à celui de l'espace-temps Minkowskien. Maintenant la coordonnée de temps (le long de l'axe vertical) est remplacée par la variable d'énergie E, et les coordonnées d'espace (dans le plan horizontal) par le vecteur d'impulsion $\vec{p}$. En mécanique classique Newtonienne. les coordonnées d'énergie et d'impulsion d'un objet matériel en mouvement uniforme de (vecteur) vitesse $\vec{v}$ étaient respectivement $E = \frac{1}{2}mv^2$ (énergie cinétique) et $\vec{p} = m\vec{v}$.

Ici encore, c'est par des points $P = (E, \vec{p})$ appartenant à une branche d'hyperbole (ou nappe d'hyperboloïde) $H^{m,+}$ semblable à la "courbe anniversaire" que vont être représentés les états d'une particule de masse m (par exemple un électron). On dira aussi que $[OP]$ est le *vecteur d'impulsion-énergie* de la particule; sa vitesse v (au sens ordinaire) est maintenant égal au rapport de coordonnées $\frac{p}{E}$. (en unités où $c = 1$, v est toujours plus petit que 1). La particule au repos ($v = 0$) est représentée par le point de $H^{m,+}$ situé sur l'axe vertical: son énergie est $E = m(c^2)$; la masse est une "réserve d'énergie".

Par contre, les particules de lumière ou "photons" ont leurs états représentés par des points $P = (E, \vec{p})$ appartenant au cône de lumière C^+: le vecteur d'impulsion-énergie $[OP]$ est le long d'une génératrice de C^+. De telles particules n'existent pas "au repos" et leur masse est nulle.

b) Dans la physique des particules, dont le but est la recherche des constituants microscopiques ultimes de la matière, de nouveaux phénomènes appelés "quantiques" sont apparus: à l'échelle infinitésimale, la façon dont la matière manifeste sa présence introduit un nouveau concept d'"incertitude" (formulé par Heisenberg), se traduisant dans la physique théorique par l'incorporation de nouvelles structures mathématiques, élaborées dans les années 1920-1930: celles de la "mécanique quantique". Cependant toutes ces particules de matière, animées de vitesses pouvant prendre toutes les valeurs possibles inférieures à la vitesse de la lumière, doivent être toujours décrites dans le cadre de l'espace-temps de Minkowski.

La description des états de particules par des points P de la nappe d'hyperboloïde $H^{m,+}$ ou du cône de lumière C^+ est maintenant remplacée par des fonctions $f(P)$, appelées "paquets d'onde", sur cet hyperboloïde ou sur ce cône. Un paquet d'onde représente seulement une "distribution de probabilité" de la particule: son impulsion-énergie pourra être mesurée avec la valeur P seulement avec une "amplitude de probabilité" donnée par le carré de $f(P)$.

Concernant le traitement des interactions fondamentales électromagnétiques et nucléaires, lesquelles régissent toutes les collisions entre particules observées dans les accélérateurs, on a pu réaliser la synthèse du cadre géométrique de l'espace-temps de Minkowski avec les structures mathématiques de la mécanique quantique: c'est là l'objet de la "théorie quantique des champs relativiste", laquelle est depuis cinquante ans un vaste domaine de recherche en physique thèorique. Les processus de collision entre particules–de matière et de lumière (photons)– donnent lieu à d'éventuelles "créations" ou "annihilations" de particules, et de façon telle que soit toujours vérifiée la *loi relativiste de conservation de l'énergie et de l'impulsion totale du système de particules* (bilan équilibré avant et après la collision).

4- L'espace-temps relativiste dans "l'infiniment grand". La relativité générale et l'espace-temps courbe

L'espace-temps relativiste a ouvert la voie, grâce encore à Einstein et à sa théorie de la relativité générale, à un autre type de généralisation géométrique, en direction de l'"infiniment grand", c'est-à-dire de la cosmologie, science visant à décrire les lois de l'univers dans son ensemble. On n'esquissera ici que très brièvement ce dont il s'agit.

Bien que muni d'une pseudo-métrique, l'espace-temps minkowskien partage encore avec l'espace euclidien la propriété d'être "plat": les mouvements uniformes (c'est-à-dire "d'inertie") y suivent des lignes droites. Mais de même que le plan euclidien doit être remplacé par une sphère (en première approximation) pour l'observateur terrestre qui s'intéresse à des distances de l'ordre de grandeur de sa planète, de même pour le spécialiste en cosmologie qui s'intéresse à la géométrie de l'univers au voisinage des étoiles et à des distances spatiales et temporelles très grandes par rapport à notre système planétaire, l'espace-temps minkowskien à 4 dimensions doit être modifié, à savoir *muni de propriétés de courbure*. Celles-ci sont produites d'une part près des étoiles par la concentration de matière, et d'autre part comme manifestation globale de l'expansion de l'univers: cette courbure qui déforme l'espace-temps et le "boursoufle" irrégulièrement (en fonction de la densité de matière) en fait ce qu'on appelle en mathématique une *"variété Lorentzienne de dimension 4"*. Cette découverte, essentiellement l'oeuvre d'Einstein s'exprimant dans sa théorie de la relativité générale, implique une immense complexité pour la géométrie spatio-temporelle de notre univers, puisque celle-ci devient inséparable de la matière. Du point de vue mathématique, notons aussi que dans la notion de "variété" s'introduit une abstraction supplémentaire de la géométrie: de mème que la surface courbe de la terre, à 2 dimensions, nous apparait forcément comme "plongée dans l'espace à 3 dimensions" qui nous entoure, de même il nous est difficile de ne pas imaginer l'espace-temps courbe à 4 dimensions comme "plongé dans un espace plat plus grand", à 5 dimensions par exemple. Et pourtant, cela n'est pas nécessaire mathématiquement: ainsi un ensemble de cartes de toutes les régions de la terre, munies de quadrillages en méridiens et parallèles nous permettant de passer d'une carte à une autre dans les sous-régions représentées sur deux cartes, nous donne une représentation complète de la terre sans aucun recours à l'espace ambiant à 3 dimensions; on dit alors que la terre est décrite comme une "variété abstraite". Cependant, le "plongement" dans un espace ambiant est une représentation qui, lorqu'elle est possible, est commode pour "l'intuition". C'est ainsi que l'on parle aussi de "variétés lorentziennes abstraites" et d'une "propriété de plongement" qui fait de celles-ci des "hypersurfaces d'un espace plat à davantage de dimensions". (Le modèle géométrique le plus simple d'espace-temps courbe appelé "univers de *de Sitter*" est représentable comme un hyperboloïde à 4 dimensions d'équation $X_0^2 - X_1^2 - X_2^2 - X_3^2 - X_4^2 = -R^2$ plongé dans un espace minkowskien à 5 dimensions). Il n'est pas possible de donner un "sens physique" à un tel "espace ambiant" à 5 dimensions ou plus ... Même si diverses considérations de physique théorique contemporaine conduisent à introduire de telles dimensions supplémentaires, non perceptibles par nos sens, pour décrire d'hypothétiques constituants ultimes de la matière en termes géométriques ("théorie des cordes") ou pour tenter de résoudre des problèmes de fond se posant en cosmologie, il s'agit là d'un domaine ouvert de la recherche et que l'on peut considérer pour l'instant comme purement spéculatif.

Il semble en tout cas bien établi que nous habitons une immense variété lorentzienne à 4 dimensions d'espace-temps "courbée par la matière": la courbure de trajets lumineux en provenance d'étoiles et passant au voisinage du soleil, constatée expérimentalement, a confirmé que cette structure mathématique –à la base de la théorie de la relativité générale due à Einstein– est bien inscrite dans notre univers. Certes nous sommes loin de connaître les propriétés géométriques globales de cet univers (même la théorie très vulgarisée du "big bang" est de nature spéculative: un modèle d'évolution cosmique actuellement largement admis). Mais à l'échelle de cette variété lorentzienne, la nature du temps physique, telle que nous l'avons fait apparaître ici dans le cadre de l'espace-temps "plat" de Minkowski (relativité "restreinte") présente à coup sûr un aspect bien intriguant pour notre conception de l'univers. Nous pouvons en effet affirmer que sur cet immense "objet quadridimensionnel courbe", des lignes d'univers analogues aux droites de l'espace-temps minkowskien, et appelées *géodésiques temporelles* continuent à vérifier ces propriétés surprenantes:

1) entre "deux points-évènements" reliés par une telle géodésique, celle-ci représente toujours *le plus long chemin temporel*: il en est ainsi essentiellement pour la ligne d'univers de la terre depuis son apparition stable dans le cosmos jusqu'à l'an 2000, et les 5 milliards d'années d'ancienneté qu'on lui attribue correspondent bien à une telle horloge (ou "temps propre") géodésique.

2) entre deux tels évènements par contre, l'on peut toujours trouver des lignes d'univers (non géodésiques) qui s'approchent aussi près que l'on veut de trajectoires de lumière, et sur lesquelles le temps propre écoulé sera aussi court que l'on veut: ainsi sur de telles lignes d'univers, nos 5 milliards d'années peuvent se réduire à une année, un mois, une semaine... Et que dire de l'instantanéité de tous les points d'une trajectoire de lumière ...? C'était là le point de départ du sujet de réflexion favori du jeune Einstein: imaginer quelqu'un chevauchant une trajectoire de lumière...?!