

Se dispenser du temps

Marc Lachièze-Rey, astroparticule et cosmologie, Paris Diderot

Cet article nous montre que pour parler de la relativité d'Einstein, une extrême rigueur est nécessaire dans le choix des termes utilisés. Des mots dont le sens est mal contrôlé peuvent véhiculer des représentations erronées et engendrer des situations apparemment paradoxales.

Souvent la physique einsteinienne – je veux dire par là les théories de la relativité restreinte et de la relativité générale – est présentée d'une manière timide, en tentant de préserver certains aspects de la vision newtonienne, notamment certaines notions à caractère temporel. L'intention est de décrire certains aspects d'une situation d'une manière conforme à notre intuition (qui correspond à peu près à la vision newtonienne). Mais cela conduit en général à des formulations alambiquées, à des acrobaties verbales qui finissent par ne plus avoir de sens, telles que « ralentissement du temps », « dilatations (ou contractions) des durées ». Ceci laisse souvent croire à un caractère paradoxal de ces théories, qui pourtant se distinguent au contraire par leur cohérence. Ce qui pose problème, et engendre d'apparents paradoxes, ce sont les tentatives de rendre compte de situations physiques avec un langage inadapté¹: ici, de les interpréter comme si le temps existait alors que nous avons appris que cette notion est incompatible avec la réalité du monde.

La principale innovation de la physique einsteinienne consiste à intégrer dans ses fondements la disparition de la notion de temps. Je ne saurais, dans un bref article, en analyser tous les tenants et aboutissants, décrits ailleurs de manière plus complète². Je présenterai ici, sans les justifier en détails, certaines des caractéristiques de cette disparition, dans le cadre de la relativité restreinte uniquement, sachant qu'une grande partie de ce qui sera écrit ici s'adapte très facilement à la relativité générale.

Événements, histoires

Physique newtonienne et physique einsteinienne partagent quelques notions fondamentales, d'ailleurs intuitives, celles d'*événements* et d'*histoires*.

Un *événement* se définit comme quelque chose qui se produit en un lieu précis et un instant, ou une date, précis (c'est en tout cas la définition de la physique newtonienne): la rencontre entre deux particules dans l'accélérateur du CERN; l'explosion d'une étoile; une comète qui s'écrase sur Jupiter, mon 20^e anniversaire...

Une *histoire*, c'est un processus: une suite continue d'événements, en général vécue par un système physique: l'évolution d'une étoile de sa naissance à sa mort explosive; la vie d'une particule de sa création à son annihilation; ma tranche de vie entre mon 20^e et mon 30^e anniversaire... Une histoire est délimitée par un événement initial et un événement final.

Ces deux notions conservent leur validité aussi bien en physique newtonienne qu'en physique einsteinienne. Du point de vue géométrique, on associe un événement à un point de l'espace-temps, une histoire à un segment de courbe dans l'espace-temps qui relie un point--événement initial à un point--événement final. Ainsi par exemple, chaque événement de ma vie est un point; ma vie elle-même est la succession continue de tous les événements que j'ai vécus de ma naissance à ma mort, qui dessine ma *ligne d'univers*. Il en est de même pour chaque objet physique, qui en fin de compte s'identifie à sa ligne d'univers.

Dates, durées, chronologie

Le temps absolu (dit « universel ») de la physique newtonienne se caractérise par deux propriétés essentielles *datation* et *durée*; la première associe un nombre à tout événement; sa date, exprimée en *temps universel*. La seconde associe un nombre à toute histoire: sa durée. En physique newtonienne, les deux notions sont bien définies et elles ont entre elles un lien fondamental;

En physique newtonienne, la durée d'un processus est égale à la différence entre les dates de l'événement final et de l'événement initial.

La notion de temps (le temps « universel » ou « absolu » de Newton) synthétise ces deux notions (et d'autres, voir *Voyager dans le temps*, op. cit.).

¹ Une situation tout à fait analogue se présente en physique quantique, lorsque, par exemple, on tente d'interpréter la réalité en termes de corpuscules localisés.

² Voyager dans le temps: la physique moderne et la temporalité, Marc Lachièze-Rey, Seuil Sciences Ouvertes 2013.

Dans la physique einsteinienne (et en fait dans le monde réel), non seulement cet énoncé n'est pas vérifié, mais il n'a pas de sens.

En physique newtonienne toujours, chaque événement a une date : on peut la connaître ou non, mais elle existe au moins en principe. Cela définit un classement, une relation d'ordre entre tous les événements, appelé la *chronologie*: selon le classement de leurs dates :

A est chronologiquement antérieur à B : $A \leq B$;

ou bien,

B est chronologiquement antérieur à A : $B \leq A$.

Si les dates sont égales ($A \leq B$ et $B \leq A$), A et B sont simultanés.

La chronologie est une relation d'ordre *total* entre les événements³ : pour A et B quelconques on a toujours $A \leq B$ ou $B \leq A$ (ou les deux).

Relativité restreinte

La caractéristique première des théories einsteinniennes, c'est l'impossibilité d'une datation objective, et par conséquent d'une chronologie objective. Précisons qu'il ne s'agit pas de l'impossibilité de *connaître* la date d'un événement, mais de l'impossibilité *de principe* de lui en associer une (du moins d'une manière objective).

Bien entendu, rien ne m'empêche d'associer plus ou moins arbitrairement un nombre à chaque événement ; à la limite, je puis le faire au hasard ; ou, pour être un peu moins fantaisiste, en suivant quelques règles « de bon sens » et définir une sorte de « datation personnelle », et donc de « chronologie personnelle ». Notre temps universel (TU) correspond exactement à un choix (raisonné) de ce type (voir ci-dessous). Il en existe beaucoup d'autres. Un tel choix effectué (celui du TU ou tout autre), je puis l'utiliser pour classer les événements ; mais ce classement n'aura aucune portée objective et aucune signification physique ; pas davantage que si j'associais à chaque événement une étiquette porteuse d'un nom arbitraire.

En effet, mon voisin peut choisir tout aussi légitimement « sa » datation en appliquant les mêmes critères que j'ai appliqués. Elle sera différente. En appliquant les mêmes procédures, il établira sa chronologie personnelle. Nous serons en désaccord non seulement sur les dates des événements, mais sur leur ordre chronologique : pour moi, A s'est déroulé avant B ; pour lui B s'est déroulé avant A, tandis que pour un troisième, ils

seront simultanés. Aucun n'a raison davantage qu'un autre et l'une des premières contributions d'Einstein fut de montrer qu'il est impossible de départager et d'établir une chronologie objective. Cette constatation fut pour lui le point de départ pour la construction de ses théories. Précisons tout de suite que le choix du TU est motivé par le fait qu'il permet un accord à une certaine famille d'observateurs --- en gros tous les habitants de la planète --- tant qu'ils ne demandent pas une grande précision. Du point de vue de la physique einsteinienne, ce choix apparaît comme une convention commode, pertinente pour notre usage personnel ; le terme « personnel » pouvant être étendu à l'humanité entière dès lors que l'on n'exige pas une trop grande précision (voir ci-dessous).

Durées propres

Au contraire, la notion de durée est parfaitement définie et opérationnelle en physique einsteinienne. On parle alors de *durée propre* : à toute histoire est associée sa durée propre. Elle est précisément calculable selon la théorie. Elle est parfaitement mesurable : c'est en fait la durée propre d'une histoire que l'on mesure le plus souvent lorsque l'on parle de mesure temporelle : entre deux tic-tacs de la montre, s'écoule par définition une seconde de durée propre de l'histoire de cette montre. Les secondes – auxquelles nous nous rapportons pour toute mesure de ce type – ne sont pas des unités de temps, mais des unités de durées propres.

Lorsque je parle de la durée des battements de mon cœur⁴, de ma respiration, de ma digestion ..., il s'agit en fait de durées propres; il en est de même pour mes processus mentaux tels que lecture, réflexion, calcul... ; il en est de même de ma sensation de l'écoulement du temps... Tout ceci se définit en termes des durées propres de portions de ma propre histoire. Ce sont bien ces durées propres que je ressens physiologiquement, que j'éprouve psychologiquement. Tout ceci de manière parfaitement ordinaire sans qu'il n'y ait jamais ni ralentissement, ni dilatation du temps ou quoi que ce soit que l'on puisse qualifier de la sorte.

La notion de durée propre est parfaitement définie et opérationnelle en physique einsteinienne, relativité restreinte comme relativité générale. Et c'est la seule notion à caractère temporel bien définie. Cependant une durée propre [le long de] de *mon*

³ En physique newtonienne, l'ordre chronologique se confond avec l'ordre causal ; cela n'est plus vrai en physique einsteinienne (voir *Voyager dans le temps, op. cit.*).

⁴ Ou inversement du *rythme* défini comme l'inverse de la durée moyenne entre deux battements.

histoire n'a aucune pertinence pour ce qui n'y participe pas directement. Je ne puis utiliser mes durées propres pour repérer les événements, ou les processus qui se déroulent sur la planète Mars ; ou, de manière générale, ailleurs que dans une position que j'occupe (ou que j'ai occupée). Le Martien ne peut pas davantage appliquer sa notion de durée propre à un processus terrestre.

Le point de la physique einsteinienne le plus déroutant, le plus difficile à assimiler (et pour certains, à admettre), c'est que les durées propres n'obéissent absolument pas à la propriété fondamentale énoncée plus haut : non seulement la durée propre d'une histoire n'est liée à aucune datation --- la notion n'existe pas de manière objective. --- mais elle ne dépend pas des seuls événements initial et final. Il est illustré par l'historiette des jumeaux proposée par Paul Langevin⁵. Elle est souvent qualifiée de « paradoxe » mais son caractère paradoxal ne surgit que lorsque l'on tente de l'analyser avec des notions inadaptées, celle de temps en particulier.

Jumeaux de Langevin

« Je n'ai développé ces spéculations que pour montrer par un exemple frappant à quelles conséquences éloignées des conceptions habituelles conduit la forme nouvelle des notions d'espace et de temps » Paul Langevin, L'évolution de l'espace et du temps
L'énoncé est simple. Les deux jumeaux Albert et Isaac fêtent ensemble, sur la planète Terre, leur 20^e anniversaire commun. Albert part voyager dans l'espace, loin et vite ; tandis que Isaac reste sur Terre. Albert revient sur Terre après avoir vécu [une durée propre de] 10 ans. En fêtant son 30^e anniversaire, il embrasse Isaac qui fête son 40^e anniversaire.

Albert et Isaac ont vécu deux histoires différentes, qui débutent par le même événement, et qui finissent par le même événement. La durée propre de l'histoire d'Albert est de 10 ans. La durée propre de l'histoire d'Isaac est de 20 ans. Il faut comprendre qu'Albert a bien vécu 10 ans dans tous les sens du terme⁶ : physique (c'est ce qu'a mesuré son horloge), physiologique (son cœur a battu 10 ans), intellectuel (il a pu lire le nombre de livres que l'on peut lire en 10 ans), psychologique (il a ressenti une durée de 10 ans). Et qu'Isaac a bien vécu 20 ans dans tous les sens du terme.

⁵ Cette version, ainsi que celles présentées la plupart du temps, diffèrent de celle originalement proposée ; voir à ce sujet Langevin ou le paradoxe introuvable, Elie During, Revue de métaphysique et de morale, n°4, 2014 (à paraître).

⁶ Je ne me prononcerai pas sur les liens exacts entre ces différentes appréhensions des durées.

Il n'y a là ni « ralentissement » du temps, ni contraction (ou dilatation) d'une quelconque durée. Il y a deux durées propres, de deux histoires différentes.

Question parfois posée. Pourquoi deux durées propres différentes alors que l'on peut apparemment échanger les points de vue ? Réponse, on ne peut échanger les points de vue : la situation --- telle qu'elle est décrite ici --- n'est pas symétrique car les deux histoires se distinguent par le fait qu'Albert a subi des accélérations durant son voyage et qu'Isaac n'en n'a pas subi⁷.

Autre question parfois posée : le problème doit-il être résolu en relativité restreinte ou en relativité générale ? Réponse : c'est indifférent ; les deux donnent exactement la même réponse⁸ (si toutefois on imagine un voyage où des champs gravitationnels importants sont en jeu, l'usage de la relativité générale est exigé⁹).

L'historiette, proposée par Langevin en 1911, met en jeu des humains pour frapper les esprits. L'aventure telle que décrite est irréalisable en pratique (mais pas en principe) à cause des difficultés techniques à atteindre des accélérations importantes. Précisons que des versions matérielles --- impliquant des horloges et des décalages moindres mais parfaitement mesurables --- ont été parfaitement vérifiées.

Géométrie

Un des avantages de la physique einsteinienne est qu'elle fournit de tout ceci une description géométrique simple, claire et élégante, en termes d'*espace-temps*¹⁰. Selon cette vision « chrono-géométrique », introduite par Minkowski, un événement se représente comme un point dans l'espace-temps, une histoire est un segment de courbe dans l'espace-temps.

Il est intéressant d'établir une analogie avec un *trajet*, qui est un segment de courbe dans l'*espace* : la *durée propre* d'une histoire est exactement l'analogie de la *longueur* d'un trajet. La notion de *durée propre* dans l'espace-temps n'est pas davantage liée à un temps (ou une datation ou une chronologie), que la notion de longueur dans l'espace.

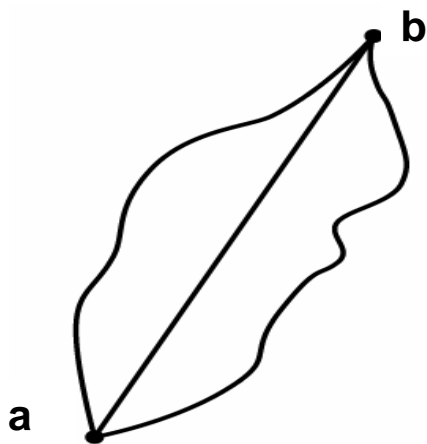
⁷ Analyse plus complète dans *Voyager dans le temps*, op. cit.

⁸ Idem

⁹ Mais pas du tout, contrairement à ce que l'on peut parfois lire ou entendre, lorsqu'il y a des *accélérations* importantes.

¹⁰ Rétrospectivement, dans un but pédagogique, on peut donner une description géométrique similaire de la physique newtonienne (elle apparaît cependant beaucoup moins naturelle). Cela permet de voir le passage de mais la physique newtonienne à la physique einsteinienne comme un changement de géométrie.

Deux histoires commençant par le même point-événement (A) et finissant par le même point-événement (B) ont des *durées propres différentes* (voir figure ci-dessous). Tout comme deux trajets commençant par le même point (a) et finissant par le même point (b) ont (en général) des *longueurs différentes*. L'analogie n'est pas du tout anecdotique mais révèle une parenté profonde entre la géométrie de l'espace-temps (minkowskien ou einsteinien) et celle de l'espace (euclidien).



Dans l'espace, la ligne droite est le trajet *de longueur minimale* entre deux points donnés a et b. Dans l'espace-temps, la ligne droite est l'histoire *de durée propre maximale* entre deux points-événements donnés A et B. Une ligne droite représente l'histoire d'un système qui ne subit aucune accélération (en géométrie de l'espace-temps, une accélération se représente par un angle). Ceci explique la différence entre les durées propres des jumeaux (voir plus haut).

Nous, les humains

Bien sûr, nous avons l'impression qu'il n'en est pas ainsi. Deux histoires commencent le 1^{er} janvier 2013 place de la Concorde (A) et se terminent toutes deux le 1^{er} janvier 2014 place de la Concorde (B). Les deux fois, j'y étais, entre les deux, j'ai vécu un an. Vous y étiez, vous avez vécu un an également. Il n'en est pas ainsi. Nous avons en fait vécu des durées propres différentes. Mais les différences sont indécélables à la précision de nos montres. À cette précision, tout se passe comme si nous avions vécu une seule et même histoire. Même si j'ai fait le tour du monde, escaladé l'Everest, voyagé en avion supersonique, tout ceci ne m'écarte pas de l'histoire commune de l'humanité.

Cependant, si nos montres avaient la précision de nos meilleures horloges atomiques actuelles, ou si nous étions sensibles à des infimes échelles de temps, je pourrai m'apercevoir que j'ai vécu quelques fractions de secondes en plus ou en moins

que mon voisin. Précisons que ceci a été vérifié expérimentalement (voir *Voyager dans le temps, op.cit.*).

Puisque nous tous, les humains, vivons la même histoire (toujours à cette précision limitée), nous pouvons la baliser par les durées propres qui s'y écoulent : c'est ainsi qu'est défini notre temps propre commun, celui que Newton avait baptisé *temps universel*. Le terme se justifie aujourd'hui à condition de rapporter cette universalité à l'humanité, en tenant compte de la précision limitée de ses capacités de mesure. Dans la vie courante, pour des expériences de précision limitée, nous pouvons nous rapporter à ce temps universel, à la datation et à la chronologie habituelles qui y sont liées. Ce que l'on qualifie de *situation non relativiste* et qui, encore un fois, ne vaut qu'avec une précision limitée.

Les situations sont en revanche « relativistes » --- et ne peuvent s'accommoder de l'usage d'une notion de temps, universel ou autre --- dès que l'on exige une précision importante sur les mesures de type temporel ; dès que l'on sort de l'environnement terrestre ; dès que des vitesses rapides sont en jeu ; dès que la gravitation devient intense.

Un satellite ou une sonde spatiale ne suit la même histoire qu'un humain terrestre. Toute navigation ou télécommunication spatiale serait impossible si l'on supposait que le temps universel s'écoule pour lui (il s'est par exemple avéré impossible de faire fonctionner le système GPS sous une telle hypothèse). Idem pour les télécommunications et la navigation spatiales, en astronomie et en cosmologie, en physique des particules, et aujourd'hui même en laboratoire pour des expériences de grande précision...

L'impossibilité d'existence du temps est donc une réalité concrète, à prendre en compte dans les expériences, les mesures, les observations. Mais sa portée est ontologique: on ne peut plus aujourd'hui supposer que le temps fasse partie de la réalité physique objective du monde ; on ne peut plus supposer que ce soit le temps (un temps) qui régisse l'évolution des phénomènes et les physiciens ont appris à s'en passer. Ce qui est surprenant, peut être rassurant, c'est que la physique sans le temps semble par bien des aspects plus simple, plus élégante ! Question, l'évolution de notre physique fondamentale¹¹ nous éloignera-t-elle encore davantage de nos notions temporelles familières ?

¹¹ voir *Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique*, éd. Le Pommier 2008.