

## En relativité tout n'est pas relatif

Étienne Klein, Directeur du LARSIM

(Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière)

*Les nouveaux programmes de physique en classe terminale de la série scientifique (B.O. spécial n° 8 du 13 octobre 2011) entrouvrent légèrement la porte à la physique du XX<sup>e</sup> siècle : celle de Relativité restreinte et de la Théorie quantique. Faute de pouvoir s'appuyer seulement sur un formalisme mathématique que ne possèdent pas les élèves, il revient au professeur de choisir le mode didactique d'approche qui lui semble préférable. Quel que soit ce choix il devient nécessaire d'apprendre à verbaliser l'introduction de ces nouveaux concepts. L'article qui suit devrait y contribuer.*

### Un tout petit peu d'histoire...

Pour comprendre la genèse et les fondements de la théorie de la relativité restreinte<sup>1</sup>, il faut dépasser le contexte de la seule année 1905 et évoquer brièvement l'histoire plus générale de certains concepts fondamentaux. La physique de la fin du dix-neuvième siècle s'appuyait sur deux piliers : la mécanique de Newton d'une part, l'électromagnétisme de Maxwell d'autre part. Chaque théorie semblait exacte, mais leurs principes étaient incompatibles.

La mécanique newtonienne se fonde sur le principe de relativité, énoncé pour la première fois par Giordano Bruno et repris ensuite par Galilée. Qu'est-ce à dire ? Dans un avion se déplaçant à sa vitesse de croisière - Bruno et Galilée ne parlaient pas d'avion, mais de navire - les choses se déroulent de la même façon qu'au sol, lorsque l'avion est à l'arrêt. Par exemple, si une hôtesse laisse échapper de ses mains un verre d'eau, celui-ci tombe exactement de la même façon dans l'avion que si l'incident se produit dans une cafétéria. Plus généralement, aucune expérience de physique ne permet de savoir si l'on se trouve dans l'avion en vol ou à l'arrêt au sol (du moins tant que l'avion se déplace à vitesse constante et en ligne droite). Le mouvement de l'avion est donc "comme rien", pour

parler comme Galilée. Une sorte d'équivalence unifie tous les référentiels, puisque les phénomènes physiques y ont la même allure et les lois physiques la même forme. Il n'existe donc pas un référentiel particulier qu'on pourrait distinguer des autres en prétendant qu'il est immobile *dans l'absolu*. En effet, ce référentiel pourra toujours être considéré comme mobile par rapport à d'autres référentiels ayant exactement le même statut que lui. En somme, aucun référentiel ne peut être dit immobile dans l'absolu.

Quant à la théorie de l'électromagnétisme, elle explique que la lumière est constituée d'ondes électromagnétiques. Or une onde, selon la conception d'un savant d'avant 1905, c'est un phénomène qui progresse en faisant vibrer quelque chose du milieu dans lequel il se propage. Dans le cas d'une vague, c'est l'eau qui vibre ou, plus exactement, la surface de l'eau. Dans le cas de la lumière, pensait-on, ce qui vibre, c'est l'"éther". On imaginait donc que l'univers était emplí jusque dans ses moindres recoins d'un milieu particulier, l'éther, dont l'existence semblait nécessaire à la propagation de la lumière. Comment ce milieu se conjugait-il à la matière ? De quoi était-il fait ? Était-il pesant, solide, liquide, élastique ? La théorie électromagnétique ne se hasardait qu'à des réponses bien "vagues", pour le coup : l'éther est sans doute incolore, probablement sans poids... Peu à peu, au cours des dernières années du dix-neuvième siècle, il se trouva dépouillé de presque toutes les propriétés physiques qu'on lui avait attribuées au départ pour n'en conserver qu'une : l'immobilité absolue. L'éther devait être un milieu absolument immobile. Or cette conclusion heurtait de plein fouet le principe de relativité, fondateur de la mécanique, l'autre pilier de la physique...

D'où le dilemme : ou bien on prenait au sérieux l'interprétation de la théorie électromagnétique, et

---

<sup>1</sup> En 1905, Einstein ne parle pas de "théorie de la relativité", mais de "principe de relativité". En 1906, Max Planck parlera dans une de ses conférences de "théorie relative" (*Relativtheorie*). La première personne à avoir utilisé l'expression "théorie de la relativité" est sans doute le physicien A. H. Bucherer, à la suite de discussions qui eurent lieu après la conférence de Planck. Paul Ehrenfest reprendra cette formule en 1907, dans l'un de ses articles, et Einstein lui-même l'utilisera dans sa réponse à cet article. L'adjectif "restreinte" fut ajouté en 1915, après qu'Einstein ait énoncé sa théorie de la relativité "générale", qui est une nouvelle conceptualisation de la gravitation.

on devait abandonner du même coup le principe de relativité ; ou bien on prenait au sérieux le principe de relativité, et on devait alors affronter le problème de l'éther.

Ce second choix est celui d'Albert Einstein : pour résoudre le problème de l'éther, il proclame tout simplement que l'éther est une entité "superflue", qui pose davantage de problèmes qu'elle n'en résout, et qu'il vaut donc mieux considérer qu'il... n'existe pas ! En conséquence, la propagation de la lumière ne résulte nullement de la mise en branle d'un milieu : elle se produit dans le vide et rien ne vibre à son passage si ce n'est elle-même, plus exactement, les ondes électromagnétiques qui la constituent.

## La relativité, une affaire d'invariance

Mais cette mise à mort de l'éther n'est pas sans conséquences. Une fois proclamée, elle oblige Einstein à remanier la formulation galiléenne du principe de relativité, ce qu'il fait à partir d'un second postulat : la vitesse de la lumière (qui est aussi celle des ondes électromagnétiques) demeure invariante lorsqu'on change de référentiel, ce qui implique qu'elle est indépendante de la vitesse de la source de lumière et de la vitesse de l'observateur par rapport à la source. L'espace et le temps en seront pour leurs frais : les longueurs et les durées ne sont plus des quantités absolues, c'est-à-dire indépendantes du référentiel dans lequel elles sont mesurées ou calculées. Mais cela n'implique nullement que "tout soit relatif". Car la théorie de la relativité met en avant des grandeurs qui, telle la vitesse de la lumière dans le vide, sont indépendantes du choix du référentiel. C'est le cas notamment pour ce qu'on appelle "l'intervalle d'espace-temps" entre deux événements.

De quoi s'agit-il ? Envisageons deux référentiels galiléens, R et R'. Les coordonnées qui repèrent un événement dans R sont du type (x, y, z, t). Les trois premières indiquent la position où a lieu l'événement, la quatrième indique l'instant où il se produit. Quant aux coordonnées de ce même événement dans R', elles sont (x', y', z', t').

Considérons deux événements 1 et 2 dans R, de coordonnées (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>, t<sub>1</sub>) et (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>, t<sub>2</sub>). Dans R, ces coordonnées deviendront respectivement (x'<sub>1</sub>, y'<sub>1</sub>, z'<sub>1</sub>, t'<sub>1</sub>) et (x'<sub>2</sub>, y'<sub>2</sub>, z'<sub>2</sub>, t'<sub>2</sub>). L'intervalle d'espace-temps entre les événements 1 et 2 est défini dans R par :

$$(\Delta s)^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$$

Dans R', il est donné l'intervalle de la même façon donné par :

$$(\Delta s')^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2 - c^2(t'_2 - t'_1)^2$$

La théorie de la relativité permet d'établir que  $(\Delta s)^2$  est égal à  $(\Delta s')^2$ . Ce résultat est capital. Il signifie que l'intervalle d'espace-temps entre deux événements est indépendant du référentiel galiléen dans lequel il est calculé. Il s'agit d'un "invariant de Lorentz".

On a souvent fait remarquer, à fort juste titre, que la théorie de la relativité était mal nommée<sup>2</sup>. En effet, elle est une théorie non pas des quantités relatives, mais des invariants : elle recherche ce qui dans la nature ne varie pas quand on change de référentiel. Gaston Bachelard l'avait fort bien perçue : "L'histoire des sciences, écrit-il, quand elle est méditée avec les lumières de la science contemporaine, appelle parfois des inversions dans les premières caractérisations d'une doctrine. La relativité est une doctrine de l'absolu. Elle va au-delà des apparences, au-delà des premières apparences bien entendu, mais au-delà surtout de ce qui a pu dominer les apparences dans une pensée antérieure."<sup>3</sup>

## Gare aux vulgates

On lit souvent que la théorie de la relativité restreinte établit que "la vitesse d'écoulement du temps dépend de la vitesse de l'observateur". Or cette formule est doublement trompeuse. D'abord parce qu'elle affirme que le temps a une vitesse d'écoulement. Or toute vitesse est une variation - plus précisément une dérivée - par rapport... au temps ! Parler d'une vitesse du temps supposerait donc qu'il y ait une variation du rythme du temps par rapport à ce même rythme, ce qui n'a pas de sens.

Cette formule est également trompeuse par le fait qu'elle laisse entendre qu'il n'existerait qu'un seul temps, le même pour tous, mais "élastique", c'est-à-dire ayant une vitesse d'écoulement qui varierait d'un observateur à l'autre. Quiconque la lit naïvement imaginera donc que s'il lui faut deux heures pour lire un livre dans sa chambre, il lui faudra un temps différent, mesuré par sa montre, pour lire un livre de même taille dans une fusée qui le propulserait dans l'espace à 150 000 kilomètres

<sup>2</sup> Selon le physicien Olivier Costa de Beauregard, le titre de "théorie de l'absolu sous-tendant les apparences" serait "incomparablement plus satisfaisant" (O. Costa de Beauregard, *Archives de philosophie*, avril 1956, p. 25.).

<sup>3</sup> Gaston Bachelard, "Le nouvel esprit scientifique", in *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972, p. 96-97.

par seconde. Or ce n'est pas le cas : il lui faudra là encore deux heures pour achever la lecture de son ouvrage... Car rappelons-nous : "Le mouvement est comme rien", disait Galilée, repris sur ce point par Einstein : quand un observateur est en mouvement rectiligne et uniforme, tout se passe comme s'il n'était pas en mouvement... Mais la différence d'avec la physique newtonienne, c'est que lorsqu'il reviendra de son voyage, sa montre ne sera plus synchronisée avec celle de ceux qui sont restés sur Terre <sup>(3)</sup> ... Car selon la théorie d'Einstein, chaque observateur est doté d'un "temps propre" qui, comme son nom l'indique, lui est propre. Dans ce

cadre, changer de référentiel, c'est-à-dire passer du point de vue d'un observateur à celui d'un autre observateur, ce n'est ni diminuer ni augmenter la vitesse d'un temps unique qui serait commun aux deux, mais tout bonnement passer d'un temps propre particulier à un autre temps propre, radicalement distinct du précédent, et sans que l'on puisse dire que l'un s'écoule plus rapidement que l'autre. En d'autres termes, en théorie de la relativité, ce qui est universel, ce n'est plus le temps lui-même, mais le fait que tout observateur en possède un qui lui est propre.

<sup>(3)</sup> En 1911, le physicien Paul Langevin a popularisé cette conséquence de la théorie de la relativité. Considérons deux frères jumeaux âgés de 20 ans. L'un d'eux part explorer le cosmos à bord d'une fusée. Il effectue un aller-retour, à la vitesse constante de 297000 km/s (99 % de la vitesse de la lumière) vers une planète située à 20 années-lumière. À son retour, le jumeau voyageur lit sur sa propre montre qu'il est parti six ans, alors que son frère resté sur terre a vieilli de quarante ans. Le jumeau sédentaire est donc devenu plus âgé que son frère, phénomène qu'on interprète couramment – mais à tort – en disant que le temps s'est écoulé pour l'un plus rapidement que pour l'autre. ■

## Et pour sourire, un clin d'œil de notre ami Daniel Bardin !

En résumé, donc : si l'on considère le cas d'une hôtesse de l'air qui, dans un vol long courrier, renverse un verre d'eau (« *comme rien* » et dans l'espace absolu) sur un référentiel doté d'une vitesse non constante, il apparaît alors que toute entité superflue qui se déplacerait beaucoup moins vite que la lumière (comme le ferait un invariant de Lorentz) ne peut, en aucun cas, atteindre l'intervalle d'espace-temps de l'observateur.

