

Bac to Basics: La relativité restreinte

Elisa Brune

Avec la collaboration de Philippe Mergny, physicien au CAF, centre de formation continue pour les professeurs de l'enseignement public francophone en Belgique.

La théorie de la relativité a complètement bouleversé la physique du vingtième siècle. Elle est réputée difficile, mais ce sont surtout ses résultats qui sont difficiles à admettre, parce que contre-intuitifs. Pourtant, ses postulats sont très simples, et les mathématiques sur lesquelles elle repose tout à fait élémentaires.

D'où vient l'idée de relativité ?

L'exemple est connu. Vous voici dans un train, légèrement assoupi. Vous regardez par la fenêtre et, question : est-ce votre train ou celui d'à côté qui se déplace ?

Dans un train ou dans un avion (sans cahots, trous d'air, ni accélération), quand nous marchons ou quand nous versons de l'eau dans un verre, tout se passe comme si le véhicule était immobile. C'est Galilée qui, au début du XVII^e siècle, émet l'idée que le mouvement est une notion relative. Si l'on fait des expériences de mécanique dans un navire qui se déplace en ligne droite, dit-il, il est impossible de détecter le mouvement du navire.

Toujours au XVII^e siècle, Isaac Newton affirme que, si un objet ne subit aucune force, il reste immobile ou bien continue son mouvement en ligne droite et à vitesse constante. C'est le principe d'inertie. Ce principe ne s'applique pas dans tous les systèmes de référence* : sur un manège, dans une voiture qui tourne ou qui freine, les objets sont déviés. On appelle système inertiel tout système de référence dans lequel le principe d'inertie est vérifié. La Terre est-elle un système inertiel ? Non, puisqu'elle tourne. Mais sa rotation est si lente (un tour par jour) que nous pouvons l'assimiler à un système inertiel dans notre vie quotidienne. Est-ce qu'il existe un système parfaitement inertiel ? Newton pense que oui. Il postule l'existence d'un "espace absolu", immobile. Les systèmes qui se déplacent en ligne droite et à vitesse constante par rapport à lui (mouvement rectiligne uniforme) sont également inertiels. Les lois de la mécanique y sont exactement vérifiées. Il pense encore que le temps est absolu et s'écoule de manière uniforme en tout point de l'espace. Pour Newton, aucune expérience de mécanique ne permet de détecter si un système inertiel est en mouvement ou non par rapport à l'espace absolu. C'est le principe de relativité galiléenne.

Le mouvement de la lumière est-il relatif ?

Galilée pense que la lumière se déplace à une vitesse finie, mais il échoue à la mesurer et conclut seulement que cette vitesse doit être très grande. Avec les techniques disponibles au XIX^e siècle, on obtient une valeur proche de 300 000 kilomètres par seconde (km/s). Ce problème en passe d'être résolu, un autre débat fait rage : la lumière est-elle de nature ondulatoire ou corpusculaire ? La question est (provisoirement) tranchée en 1860 par l'expérience des physiciens français Fizeau et Foucault. La lumière est ralentie lorsqu'elle pénètre dans l'eau : cela signifie que c'est une onde. Mais, à l'époque, qui dit onde, dit milieu de propagation. En effet, les ondes connues se propagent de proche en proche par déformation du milieu ambiant (air, eau,...) Quel est le milieu qui permet la propagation de la lumière provenant du Soleil et des étoiles vers la Terre ? On l'appela « éther », sans rien savoir de lui.

En 1880, l'Américain Michelson voulut mettre en évidence le déplacement de la Terre dans l'éther. On prévoyait que la vitesse de la lumière ne serait pas identique selon qu'on la mesure dans le même sens que le mouvement de la Terre ou bien dans le sens inverse. En effet, la Terre, sur son orbite, poursuit l'onde lumineuse dans un sens et la fuit dans l'autre. On devrait donc trouver un écart de l'ordre de 30 km/s en comparant ces deux vitesses. L'appareil inventé par Michelson aurait pu détecter cette différence. Mais les résultats furent formels : il n'y avait aucune variation

dans la vitesse de la lumière. Tout se passait comme si la Terre était tout le temps immobile dans l'éther. Les physiciens essayèrent pendant vingt-cinq ans de comprendre ce résultat déconcertant.

Quelle est l'idée d'Einstein ?

En une seule année (1905), en marge de son travail au Bureau des brevets suisse de Berne, Einstein envoya quatre articles révolutionnaires à la revue scientifique allemande *Annalen der Physik*. Dans le quatrième article, il expose ce que nous appelons aujourd'hui la relativité restreinte. Il part des " *essais infructueux destinés à déceler un mouvement quelconque de la Terre par rapport à l'éther* " pour suggérer que l'immobilité absolue n'existe pas. Ensuite, il propose deux postulats de base pour construire sa théorie :

1) Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels. On ne peut donc pas s'apercevoir de l'état de mouvement d'un système inertiel en menant des expériences dans celui-ci, car leurs résultats seront toujours équivalents. C'est le principe de relativité. Il rappelle la relativité galiléenne, mais il s'applique de façon plus large à tous les phénomènes physiques.

2) La vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du mouvement de la source. N'importe quelle mesure faite dans n'importe quel référentiel inertiel donnera toujours la même valeur pour cette vitesse notée c . Les mesures modernes donnent 299 793 km/s.

Le résultat incompréhensible de l'expérience de Michelson est érigé en principe. Einstein montre que c'est l'idée que nous nous faisons de l'espace et du temps qui était la cause de notre incompréhension. Si l'on s'applique à maintenir les deux principes de la relativité restreinte dans tous les raisonnements, il n'en résulte aucune contradiction mathématique. En revanche, des notions comme la durée, la longueur, la simultanéité sont complètement redéfinies. L'espace absolu et le temps absolu de Newton volent en éclat. Einstein montre qu'en réalité ces deux notions n'ont aucune réalité physique.

Qu'y a-t-il de paradoxal dans les postulats d'Einstein ?

Les deux premières conséquences des postulats d'Einstein sont contraires à l'intuition.

1. Il est impossible de se déplacer plus vite que la lumière. Imaginez-vous à bord d'un vaisseau spatial qui émet un rayon lumineux vers l'avant. Vous voyez cette lumière s'éloigner de vous à la vitesse c . L'occupant d'un autre vaisseau spatial vous voit passer. Il mesure la vitesse de cette lumière et trouve également la valeur c . D'où sa conclusion : votre vaisseau avance moins vite que la lumière.

2. La simultanéité est relative. Vous êtes toujours dans votre vaisseau spatial et vous allumez une ampoule située au centre du cockpit. La lumière se déplaçant à la même vitesse dans toutes les directions, vous voyez qu'elle arrive exactement en même temps sur chacune des parois du cockpit. L'autre observateur en revanche n'est pas d'accord avec vous : comme votre vaisseau avance, la lumière aura moins de distance à parcourir pour parvenir à la paroi arrière du cockpit qu'à la paroi avant et l'atteindra donc plus vite. Conclusion : deux événements simultanés dans un système ne le sont pas dans l'autre.

Avec Einstein, le mot " simultané " n'a plus de sens absolu. Avant de l'employer, nous devons toujours préciser dans quel système de référence nous nous plaçons (ici, un vaisseau ou l'autre).

Insistons sur un paradoxe : la constance de la vitesse de la lumière implique qu'au bout de une seconde, les ondes lumineuses se trouvent à 299 793 km de chaque observateur, alors que ceux-ci ne se trouvent plus au même endroit ! Il n'y a qu'une explication possible : les mesures de temps et d'espace sont faussées par le mouvement.

Pourquoi dit-on que le temps se dilate ?

Imaginons une horloge idéale, parfaitement régulière. Par exemple, une horloge à lumière : deux miroirs sont placés l'un en face de l'autre, une impulsion lumineuse est envoyée vers un miroir, qui la réfléchit vers l'autre, et ainsi de suite. Ces battements réguliers donnent une mesure du temps, un tic-tac parfait.

Embarquons deux horloges à lumière identiques dans deux vaisseaux spatiaux en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre. Les horloges sont placées de telle sorte que les

miroirs soient parallèles au mouvement. Supposons que vous vous trouviez dans le premier vaisseau, et moi dans le second, et adoptons votre point de vue. Au moment où je vous dépasse, la lumière part du miroir inférieur dans nos deux horloges. Un peu plus tard, vous voyez que les deux faisceaux lumineux ont parcouru la même distance.

Pour vous, la lumière de votre horloge a atteint son deuxième miroir, tandis que celle de mon horloge n'a pas encore rejoint le sien, puisque mon vaisseau a avancé entre-temps. Le tic-tac vous paraît retardé. Le temps d'un système que l'on voit bouger semble donc s'écouler plus lentement que le temps du système où l'on se trouve.

Par cette simple constatation, voilà notre conception du temps complètement bouleversée. Mais ce n'est pas tout. Si nous reprenons notre raisonnement en supposant que c'est moi qui observe votre horloge, comme votre vaisseau s'éloigne également du mien, j'aurai moi aussi l'impression que votre horloge retarde.

A la limite, si nous observions un vaisseau dont la vitesse tend vers la vitesse de la lumière, nous verrions son horloge tendre vers l'arrêt, tandis que ses occupants verraient notre horloge tendre vers l'arrêt. Le temps que nous lisons sur notre horloge, lui, nous semble toujours s'écouler de la même façon.

Pourquoi dit-on que les longueurs se contractent ?

Mesurer la longueur d'un objet, c'est regarder où se trouvent ses extrémités à un moment déterminé (pour un système de référence donné). Or, nous avons vu que deux observateurs en mouvement relatif ne sont pas d'accord sur la simultanéité. Ils ne seront donc pas d'accord sur les mesures de longueur. On peut montrer que si le temps d'un système en mouvement semble s'écouler moitié moins vite, les longueurs des objets qui l'accompagnent semblent deux fois plus courtes dans la direction du mouvement. Le coefficient de contraction des longueurs est l'inverse du coefficient de dilatation du temps. Mais à nouveau, les deux observateurs peuvent dire la même chose. Chacun voit "rétrécir" les objets en mouvement.

La contraction apparente résulte de la manière différente dont les observateurs situent les extrémités de ceux-ci : les objets ne sont pas modifiés par le mouvement, mais les observateurs sont en désaccord sur la position de leurs deux bouts.

Imaginons une grange de 20 mètres de long, et une échelle de 25 mètres (mesures faites dans un système où les objets sont au repos). *A priori*, aucun espoir de pouvoir ranger l'échelle dans la grange. Pourtant, le fermier, qui a lu Einstein, pense avoir trouvé la solution : il va lancer l'échelle à très grande vitesse, de sorte qu'elle ne mesure plus que 20 mètres. Adoptons maintenant le point de vue de la fourmi qui se trouve sur l'échelle. Pour elle, la grange se rapproche à très grande vitesse... et ne mesure que 16 mètres (le facteur de contraction est exactement le même que pour le fermier, soit $5/4$). Le fermier pense que l'échelle entre tout juste, la fourmi pense qu'elle n'entre pas du tout. Qui a raison ?

Les deux raisonnements sont corrects dans leur système de référence, mais aucun des deux n'est absolu. Pour le fermier, l'échelle sera un court instant entièrement dans la grange... avant de démolir le mur du fond ! Pour la fourmi, à aucun moment l'échelle n'est entièrement dans la grange : l'avant cogne le mur du fond alors que l'arrière n'est pas encore entré. Chacun a raison, de son point de vue.

Pourquoi dit-on que le temps et l'espace se mélangent ?

En relativité restreinte, chaque événement donne lieu à autant de descriptions qu'il y a de référentiels différents. Heureusement, il est possible de construire un lien entre les différents points de vue : les transformations de Lorentz, quatre relations mathématiques, permettent de savoir à quel endroit et à quelle heure un événement s'est déroulé dans un référentiel quand on connaît l'endroit et l'heure où il s'est déroulé dans un autre référentiel.

En mécanique classique, la mesure du temps était absolue. Un voyageur assis dans un train, qui ouvrirait son journal, puis le refermerait un peu plus tard, mesurerait une minute comme intervalle de temps entre les deux événements, et zéro comme intervalle d'espace. Un observateur sur le quai mesurerait lui aussi une minute comme intervalle de temps entre les mêmes événements, mais un kilomètre comme intervalle d'espace. La durée était absolue alors que l'écart spatial ne l'était pas.

Mais les transformations de Lorentz nous apprennent que l'heure dépend de l'endroit et l'endroit dépend de l'heure. Le temps et l'espace sont mêlés. La durée de lecture du journal et la distance qui sépare l'endroit où elle a commencé de celui où elle a fini dépendent toutes les deux de l'observateur. Cependant, une certaine combinaison de ces deux grandeurs est la même pour tous les observateurs : l'intervalle d'espace-temps* qui, lui, est absolu. L'espace et le temps ne sont pas les mêmes pour tout le monde. L'espace-temps, oui.

Que veut dire $E = mc^2$?

Les postulats d'Einstein ont bousculé nombre d'autres acquis de la physique que nous n'avons pas évoqués jusqu'à présent. L'un d'eux est la loi fondamentale de la dynamique énoncée par Newton. Que nous dit-elle ? Lorsqu'une force agit sur un objet, sa vitesse change ; il est accéléré. L'accélération est égale à la force appliquée divisée par la masse de l'objet. Imaginons que nous appliquions pendant très longtemps une force importante sur un objet. La loi de Newton prévoit que sa vitesse augmente continuellement jusqu'à dépasser c . Impossible nous dit la relativité.

Einstein résout le problème en disant que la masse augmente avec la vitesse. A l'approche de la vitesse de la lumière, la masse tend vers l'infini. Il est donc impossible d'accélérer suffisamment l'objet pour qu'il aille aussi vite que la lumière. Par contre, si la vitesse de l'objet est faible par rapport à celle de la lumière, la masse est pratiquement égale à la masse au repos*, et la loi de Newton fonctionne parfaitement. C'est le cas dans notre vie quotidienne.

Que devient l'énergie transmise à l'objet par la force, dans la nouvelle expression de la loi de Newton ? Augmentant la vitesse de l'objet, elle augmente aussi sa masse. Tout apport d'énergie se traduit par une variation de masse. L'augmentation de masse et l'énergie transmise au corps peuvent donc être considérées comme des mesures différentes de la même chose.

Ainsi, on aboutit à l'une des unifications les plus spectaculaires de la physique moderne. Avant Einstein, la physique connaissait deux principes de conservation fondamentaux, complètement indépendants : la conservation* de la masse et celle de l'énergie. La théorie de la relativité les réunit : c'est la masse-énergie qui se conserve. On parle souvent d'équivalence entre l'énergie (E) et la masse (m) : $E = mc^2$. Comme l'écrit Einstein : "*La masse d'un corps est la mesure de son contenu en énergie.*"

La relativité restreinte est-elle vérifiée ?

Oui, c'est même l'une des théories les plus abondamment et précisément vérifiées par l'expérience. Mais les effets relativistes ne sont sensibles que pour des vitesses très élevées. Il faut donc disposer d'accélérateurs de particules très puissants ou d'appareils de mesures extrêmement sensibles, de préférence les deux.

Pour prendre un seul exemple, le fait que la vitesse de la lumière constitue une limite infranchissable s'illustre quotidiennement dans les accélérateurs de particules, où il faut injecter des quantités d'énergie de plus en plus grandes pour obtenir des accélérations de plus en plus faibles (alors que les lois de Newton prédisent une augmentation continue de la vitesse). Il faut plus que doubler l'énergie fournie à un proton* pour élever sa vitesse de 299 144 km/s à 299 585 km/s, soit à peine un millième de plus. C'est qu'entre-temps le proton a acquis trente et une fois sa masse au repos. Dans les phénomènes quotidiens, en revanche, les effets relativistes sont inexistantes, et les équations d'Einstein se ramènent à celles de Newton. En ce sens, on peut dire qu'Einstein n'a pas détrôné la mécanique classique, il l'a reformulée en termes plus généraux, valables jusqu'aux vitesses proches de celle de la lumière.

Quel est le jumeau le plus vieux ?

Considérons des jumeaux. L'un d'eux embarque dans une fusée et part à grande vitesse. Puisqu'il est en mouvement par rapport à la Terre, ses horloges, son cœur, tout semble ralentir (pour son frère resté sur Terre). Quand il revient, il est plus jeune que son frère.

Adoptons le point de vue du frère parti en fusée. Lui aussi voit son frère resté sur Terre s'éloigner de lui à grande vitesse, avec un rythme biologique ralenti. Quand il revient sur Terre, c'est donc son frère qui est plus jeune que lui ! L'auteur de cette histoire est le physicien Paul Langevin*. ON

parle depuis Iros du « paradoxe des jumeaux de Langevin ».

L'erreur de raisonnement ? Tout ce que nous avons expliqué jusqu'ici est valable pour des référentiels inertiels. Dans le scénario imaginé par Langevin, la fusée doit accélérer pour partir, freiner pour faire demi-tour, changer de direction, accélérer encore puis freiner à l'arrivée. La relativité restreinte ne s'applique pas à ce cas compliqué. La réciprocité est faussée parce qu'un seul des deux jumeaux a subi les effets de fortes accélérations.

C'est en ce sens que la relativité évoquée ici est restreinte, parce qu'elle n'est valable que dans les systèmes inertiels. Quelques années plus tard, Einstein développera une théorie valable pour tous les systèmes de référence, qu'on appellera " relativité générale ". C'est elle qui pourra traiter le problème des jumeaux.

A lire

Albert Einstein, *La relativité*, Petite bibliothèque Payot, 25, 1956.

Bertrand Russel, ABC de la relativité, 10/18 bibliothèques n°233, 1965

Stamatia Mavridès, La relativité, Que sais-je n°37, 1988

Raymond Schaeffer, La relativité d'Einstein à aujourd'hui, Nathan (coll 128) n° 47, 1994

* On appelle **système de référence**, un ensemble d'axes imaginaires sur lesquels on repère la position des objets. Habituellement, le système d'axes est lié à un objet d'importance particulière pour l'expérimentateur : le train où il se trouve, la Terre, le Soleil, une fusée... Dans ce système, l'objet en question est immobile.

* Si la durée entre deux événements est égale à Δt , et la distance entre ces deux événements est d , l'intervalle d'**espace-temps** vaut $s = \sqrt{(c^2 \Delta t^2 - d^2)}$

* La **masse au repos** d'un objet est la masse mesurée par un observateur par rapport auquel cet objet est immobile.

* Dans un système qui n'échange ni matière ni énergie avec l'extérieur (système fermé), la masse et l'énergie sont chacune conservées lors de toutes transformations.

* Le **proton** est une particule chargée positivement, un des constituants des noyaux atomiques.

* Physicien français, Paul **Langevin** (1872-1946) a notamment formulé une théorie électronique complète des phénomènes magnétiques. Il s'est beaucoup attaché à populariser la théorie de la relativité au moyen d'exemples imagés.