

INITIATION A LA THEORIE DE LA RELATIVITE RESTREINTE D'EINSTEIN

Voici près de 110 ans, en 1905, paraissait le premier article d'Albert Einstein sur la théorie de la Relativité. Celle-ci a marqué un important tournant dans l'évolution de la science moderne et est devenue une des bases de la physique. Elle est vérifiée régulièrement par les innombrables expériences conduites sur les particules élémentaires et dans les réactions nucléaires. De nombreux articles et des livres de vulgarisation sur ce sujet ont été publiés

Elle reste cependant, dans l'esprit d'un vaste public, une théorie mystérieuse accessible seulement à quelques initiés. Einstein a pourtant montré qu'il était possible d'en donner un exposé suffisamment simple pour qu'il soit accessible à des personnes ne possédant pas l'appareil mathématique de la physique théorique, et cependant suffisamment précis pour que ceux qui s'intéressent à elle du point de vue général en aient une vue aussi exacte que possible.

En suivant Einstein, on peut montrer que la théorie de la Relativité est née des difficultés et des contradictions expérimentales dans lesquelles se débattaient les anciennes théories de la physique du XIX^{ème} siècle, contradictions pouvant être surmontées par une analyse des notions d'espace, et de temps. On aboutit à certaines conséquences qui ont obligé les physiciens à renouveler ces notions et à introduire le concept d'espace-temps. L'ensemble des résultats qui en résultent constitue la première théorie de la Relativité d'Einstein qui est connue sous le nom de « Relativité Restreinte ».

Dans cet exposé nous suivrons l'itinéraire indiqué par Einstein en utilisant comme lui des exemples simples pour illustrer les notions introduites. Nous rappelons aussi chaque fois que cela est nécessaire les lois et les résultats des théories antérieures de manière à souligner les difficultés auxquelles elles se heurtaient dans certains cas et les apports des conceptions einsteiniennes.



Einstein en 1905

Avant Einstein

- Les concepts d'espace et de temps

Les notions d'espace et de temps nous paraissent familières et évidentes.

Beaucoup d'entre nous pensent que le temps s'écoule de la même manière pour tout le monde et que l'espace est une sorte de cadre dans lequel se meuvent les planètes, les étoiles, les galaxies et autres objets que l'on rencontre dans l'univers, sans que ceux-ci n'interagissent avec lui.

En fait, ces concepts absolus d'espace et de temps sont des notions très évoluées qui sont apparues peu à peu et qui ont trouvé leur formulation scientifique précise à partir des travaux de Newton au XVII^{ème} siècle. Il faut cependant remarquer que Newton a toujours distingué l'espace et le temps absolus d'une part, et l'espace et le temps relatifs d'autre part.

L'espace relatif est défini par rapport aux mesures de distances effectuées par rapport à un corps de référence. De même, le temps relatif est déterminé par rapport au temps donné par une horloge de référence.

Les mesures de distances s'effectuent à l'aide de règles étalonnées, les mesures de temps le sont à l'aide d'horloges synchronisées sur une horloge de référence.

Newton a souligné que seuls l'espace et le temps relatifs étaient susceptibles de mesures approchées. Ses successeurs n'ont pas toujours fait preuve de la même prudence, si bien que les notions d'espace et de temps absolus se sont trouvées profondément ancrées dans la physique et la philosophie des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles.

- Espace et temps absolus

Dans la physique newtonienne, l'espace absolu est identifié à un espace géométrique de structure euclidienne (c'est-à-dire qu'il obéit aux propositions de la géométrie d'Euclide). Cette structure est de plus considérée comme étant indépendante du temps et du contenu matériel de l'Univers. Le temps est, quant à lui, interprété comme une échelle absolue, une échelle qu'il faut utiliser pour mesurer la durée de toutes choses. Cette échelle est considérée comme une entité de l'Univers au même titre que l'espace et la matière qu'il contient.

L'espace et le temps sont donc absolus et indépendants l'un de l'autre. Ils sont également indépendants de la matière de l'Univers. Cette matière pourrait disparaître sans affecter leur existence.

- Le mouvement

L'étude du mouvement des corps constitue une branche de la physique que l'on appelle la mécanique. Le mouvement est défini par le déplacement des corps d'un lieu à un autre.

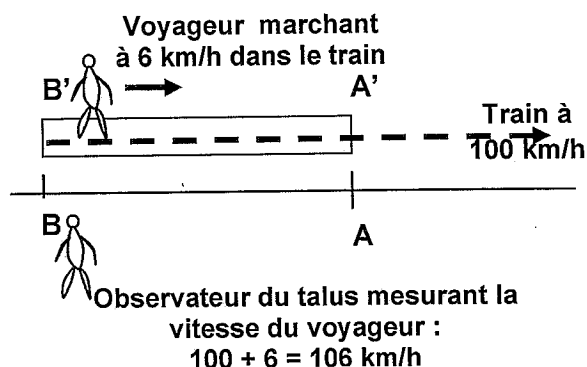
Newton a distingué ici encore le mouvement absolu du mouvement relatif. Le mouvement relatif est celui qui s'effectue par rapport à un corps de référence, d'où l'importance des systèmes de référence en mécanique. Et le mouvement absolu est celui qui s'effectue par rapport à l'espace absolu.

Une loi essentielle de la mécanique est celle qui relie les vitesses d'un corps mesurées par rapport à deux corps de référence en mouvement l'un par rapport à l'autre.

Pour illustrer cette relation, voici un train animé d'une vitesse constante de 100 km/heure par rapport à la voie ferrée. Supposons qu'une personne se déplace dans un wagon dans le sens de la marche du train à 6 km/heure par rapport au wagon. La question qui se pose est la suivante : quelle est la vitesse du voyageur mesurée par rapport à la voie ferrée ?

La réponse semble résulter de ce raisonnement : si le voyageur était immobile dans le train, sa vitesse serait de 100 km/heure par rapport à la voie ferrée. En une heure il se déplacerait de 100 km par rapport à ce corps de référence. En réalité, il parcourt durant ce temps une distance égale à 6 km dans le train que l'on suppose suffisamment long. Cette distance s'ajoute à la précédente et le voyageur parcourt donc au total une distance de 106 km relativement à la voie ferrée. Sa vitesse par rapport à ce corps de référence est ainsi de 106 km à l'heure.

Le relation cherchée semble être un simple addition. C'est le **théorème d'addition des vitesses de la mécanique de Newton**.



- Le principe de relativité de Galilée

La mécanique de Newton obéit à un principe fondamental qui est appelé « **principe de relativité galiléen** ».

Il dit qu'il est impossible de mettre en évidence, par une expérience de mécanique, le mouvement d'un corps en translation rectiligne et uniforme par rapport à l'espace absolu. Il est ainsi impossible de faire une distinction entre les systèmes de référence en translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres. Ce principe peut être illustré par des expériences que l'on peut faire dans un train qui se déplace sur une voie ferrée rectiligne à vitesse constante.

De ce fait, on voit que les systèmes de référence en mouvement de translation rectiligne et uniforme ont des propriétés particulières qui leur donnent une grande importance dans la physique. On les appelle : « **systèmes de référence galiléens** » ou « **systèmes de référence d'inertie** ».

Donnons quelques exemples de tels référentiels : une fusée spatiale flottant dans l'espace moteur arrêté, ou encore de manière plus approximative un train en translation rectiligne et uniforme, un quai de gare, etc.

Le principe de relativité de Galilée exprime que les lois de la mécanique sont les mêmes dans tous les systèmes de référence galiléens.

- L'électromagnétisme

Vers la fin du XIX^{ème}, l'électromagnétisme représentait une autre branche de la physique. Cette discipline s'est constituée par la synthèse de l'électricité, du magnétisme et de l'optique.

La synthèse a été achevée par le physicien britannique Maxwell qui a montré en particulier que la lumière est constituée par la propagation d'une onde électromagnétique vibrant à très haute fréquence. Par analogie avec une onde sonore qui nécessite pour se propager la présence d'un milieu matériel, les physiciens de ce XIX^{ème} siècle ont été amenés à postuler l'existence d'un milieu transparent remplissant tout l'espace et assumant la propagation de la lumière dans le vide.

Ils ont appelé ce milieu « l'éther », supposant qu'il était immobile par rapport à l'espace absolu. La vitesse de la lumière était estimée constante par rapport à cet éther et voisine de 300.000 km par seconde. Les propriétés physiques que devait posséder ce milieu hypothétique étaient paradoxales : par exemple, les corps matériels pouvaient se déplacer à travers lui sans aucun frottement. De plus, il s'avérait difficile, sinon impossible, de le mettre directement en évidence par des expériences.

- L'expérience de Michelson et Morley

Pourtant, vers la fin du XIX^{ème} siècle, plusieurs physiciens ont imaginé des expériences ayant pour but de mettre en évidence l'existence de cet éther. En particulier, Michelson et Morley ont mesuré la vitesse de la lumière par rapport à la Terre dans différentes directions et à diverses époques de l'année, dans le but de vérifier le mouvement de notre planète par rapport à l'éther et donc à l'espace absolu.

En effet, si on tient compte du théorème d'addition des vitesses de la mécanique de Newton et des propriétés supposées de l'éther, il semble évident que la vitesse de la lumière mesurée par rapport à la Terre doit dépendre du mouvement de cette dernière par rapport à l'espace absolu et aussi par rapport au Soleil.

Mais le résultat des mesures s'est toujours avéré négatif. Tous les essais ont montré que la vitesse de la lumière dans le vide, mesurée par rapport à la Terre, était invariable quelles que soient les conditions et l'époque de l'année.

De multiples expériences effectuées depuis cette époque ont toujours montré que la vitesse de la lumière est constante dans tous les référentiels galiléens quels que soient leurs mouvements les uns par rapport aux autres.

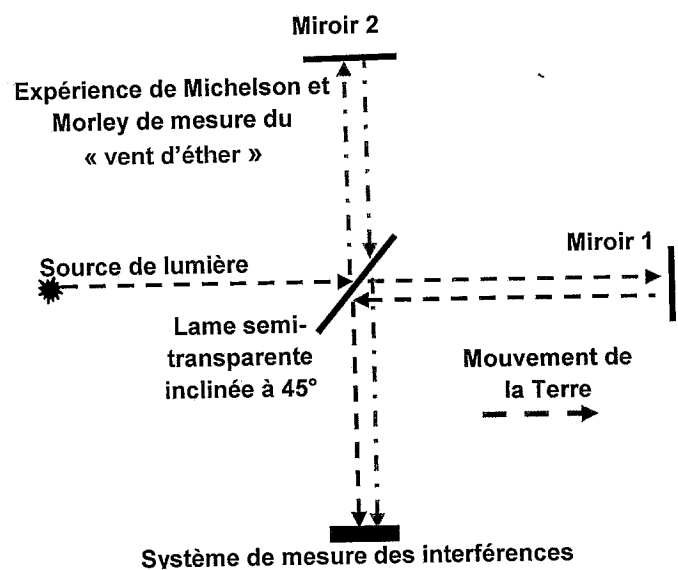
Ces résultats expérimentaux sont en contradiction avec le théorème d'addition des vitesses de la mécanique classique.

- L'interprétation de Lorentz

Pour rendre compte de ces résultats, Lorentz, un des plus grands physiciens de l'époque, a supposé qu'il existait des mécanismes de compensation qui annulaient l'effet que Michelson et Morley désiraient mesurer. Selon Lorentz, les objets se déplaçant dans l'éther subissaient une contraction dans la direction du mouvement. Celle-ci ne dépendait pas de la nature des objets mais seulement de leur vitesse par rapport à l'éther. Elle permettait d'annuler exactement les variations de la vitesse de la lumière que l'on cherchait à mettre en évidence.

En fait, la contraction introduite par Lorentz ne permettait pas d'expliquer toutes les expériences et il était nécessaire de faire appel à d'autres hypothèses ad hoc et indépendantes entre elles. Cette situation ne satisfaisait pas les théoriciens de l'époque et en premier lieu Lorentz lui-même.

Albert Einstein devait donner, en 1905, l'interprétation correcte de ces phénomènes.



Einstein et la théorie de la Relativité Restreinte

- La position d'Einstein

La position d'Einstein est très différente de celle de Lorentz. Pour Einstein, tout d'abord, la notion d'éther n'a pas de sens physique puisqu'il est impossible de la mettre en évidence par une expérience. Elle doit donc être abandonnée. Ensuite, puisque les mesures de la vitesse de la lumière dans le vide montrent que celle-ci a la même valeur dans tous les référentiels galiléens, c'est qu'elle doit être la même dans tous ces référentiels. Einstein a donc énoncé les deux postulats suivants :

- 1) le premier qui est appelé « **principe de la Relativité Restreinte** » exprime que **toutes les lois de la physique**, non seulement celle de la mécanique mais aussi de l'électromagnétisme, de l'optique, etc., **sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens** ;
- 2) le second énonce que la **vitesse de la lumière dans le vide est une constante universelle dans tous les systèmes de référence galiléens**.

Les conséquences que l'on peut tirer de ces deux postulats permettent de supprimer toutes les contradictions qui apparaissaient entre les résultats expérimentaux et la théorie mécanique newtonienne. Cependant, elles ont obligé Einstein à modifier profondément les notions d'espace et de temps absolus.

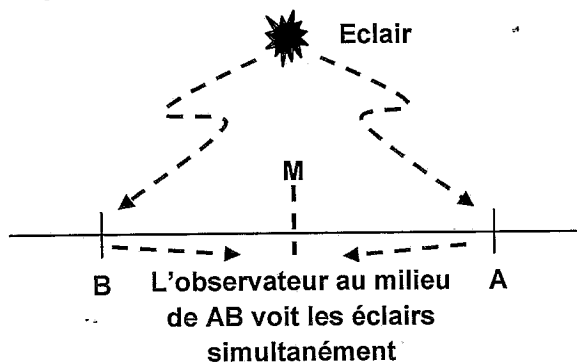
Pour montrer ces résultats, nous allons suivre Einstein dans ses critiques des notions classiques d'espace et de temps en commençant par l'étude de la simultanéité de deux événements. Nous utiliserons pour cela des exemples simples comme Einstein l'a fait lui-même dans son livre : La Relativité (voir bibliographie).

- Simultanéité de deux événements

Imaginons que la foudre frappe la voie de notre chemin de fer aux deux points A et B très distants l'un de l'autre. Si quelqu'un affirme que ces deux événements ont été simultanés, il nous faut vérifier si cela correspond à la réalité. Et il nous faut aussi voir si cette notion de simultanéité a un sens.

Einstein écrit à ce sujet dans son ouvrage « La Relativité », Gauthier-Villard, page 25 :

« Cette notion n'existe pour le physicien que s'il a trouvé la possibilité de vérifier, dans le cas concret, si elle est ou si elle n'est pas exacte. Nous avons besoin d'une définition telle de la simultanéité qu'elle nous donne une méthode au moyen de laquelle nous pouvons décider dans le cas qui nous occupe, par des expériences, si les deux coups de foudre ont été simultanés ou non. Tant que cette exigence n'est pas satisfaite, je suis comme physicien (et aussi comme non physicien) victime d'une illusion, si je crois pouvoir attacher un sens à l'affirmation de la simultanéité ».



Et pour marquer l'importance de cette exigence, Einstein ajoute : « Si vous ne m'accordez pas cela, cher lecteur, avec conviction, il est inutile de continuer ».

Un moyen pour constater la simultanéité peut être le suivant : 1) on mesure la droite AB le long de la voie ferrée et l'on place au milieu de cette droite en M un observateur muni d'un appareil qui lui permet de voir en même temps les points A et B ; 2) s'il aperçoit les éclairs en même temps, ils sont simultanés.

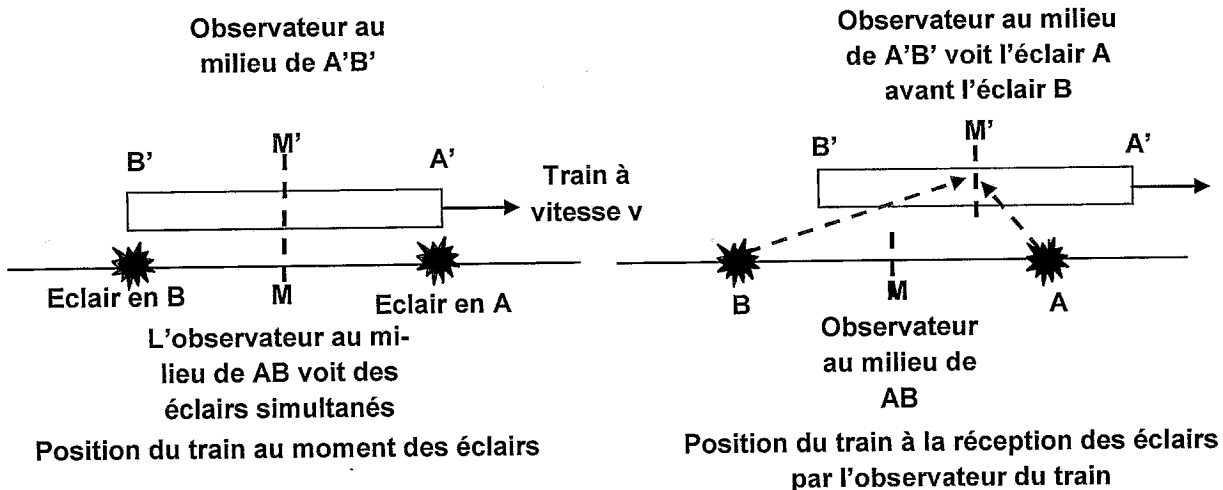
Ce moyen peut constituer la définition même de la simultanéité ainsi qu'une définition du temps. En effet,

on peut également se servir d'un éclair lumineux pour synchroniser toutes les horloges d'un même système de référence (par exemple les horloges disposées le long de la voie ferrée). Il est donc possible de se donner une définition de la simultanéité pour un système de référence (par exemple la voie ferrée) et de synchroniser les horloges de ce système.

De même, considérons un train très long se déplaçant sur la voie rectiligne avec une vitesse constante. Les voyageurs du train ne subissent aucune accélération due au mouvement et auront intérêt à se servir du train comme corps de référence. Tout événement qui a lieu le long de la voie a aussi lieu en un point déterminé du train.

La définition de la simultanéité peut être formulée exactement de la même façon par rapport au train que par rapport à la voie. De même, le procédé qui nous a permis de synchroniser les horloges de la voie peut être utilisé pour synchroniser celles du train.

La première question qui se pose à ce stade est la suivante : deux événements (par exemple deux éclairs A et B qui sont simultanés par rapport à la voie) sont-ils encore simultanés par rapport au train ? Pour répondre à cette question, considérons l'expérience suivante : imaginons que les éclairs A et B sont produits par deux lampes situées sur la voie de part et d'autre d'un quai de gare. La lampe A s'allume quand la tête du train arrive en A, la lampe B s'allume lorsque la queue du train passe en B.



Pour effectuer les observations, nous plaçons un observateur au bord de la voie ferrée sur le quai en M au milieu de AB, muni d'un appareil lui permettant de voir en même temps les points A et B. Un autre observateur est installé au milieu du train en M', lui aussi muni d'un appareil lui permettant d'observer simultanément la tête et la queue du train.

Si, dans notre expérience, l'observateur placé en M sur le quai voit au même instant les deux éclairs provenant de A et B. Il en conclut que : 1) l'allumage des lampes a été simultané, 2) la longueur du train est égale à la distance AB des deux lampes fixes, c'est-à-dire à la longueur du quai.

Supposant maintenant que l'observateur placé en M' dans le train se trouve juste à la hauteur de M à l'instant de l'allumage des lampes du quai. Le train emporte M' à la rencontre du rayon issu de A tandis qu'il l'éloigne du point B. Le voyageur en M' voit donc d'abord l'éclair A et ensuite seulement l'éclair B. Il en conclut alors que : 1) les deux éclairs ne sont pas simultanés, 2) la longueur du train est supérieure à la distance AB des lampes, donc supérieure à la longueur du quai puisque la tête du train est passé avant que la queue n'ait franchi B.

Nous aboutissons aux conclusions suivantes :

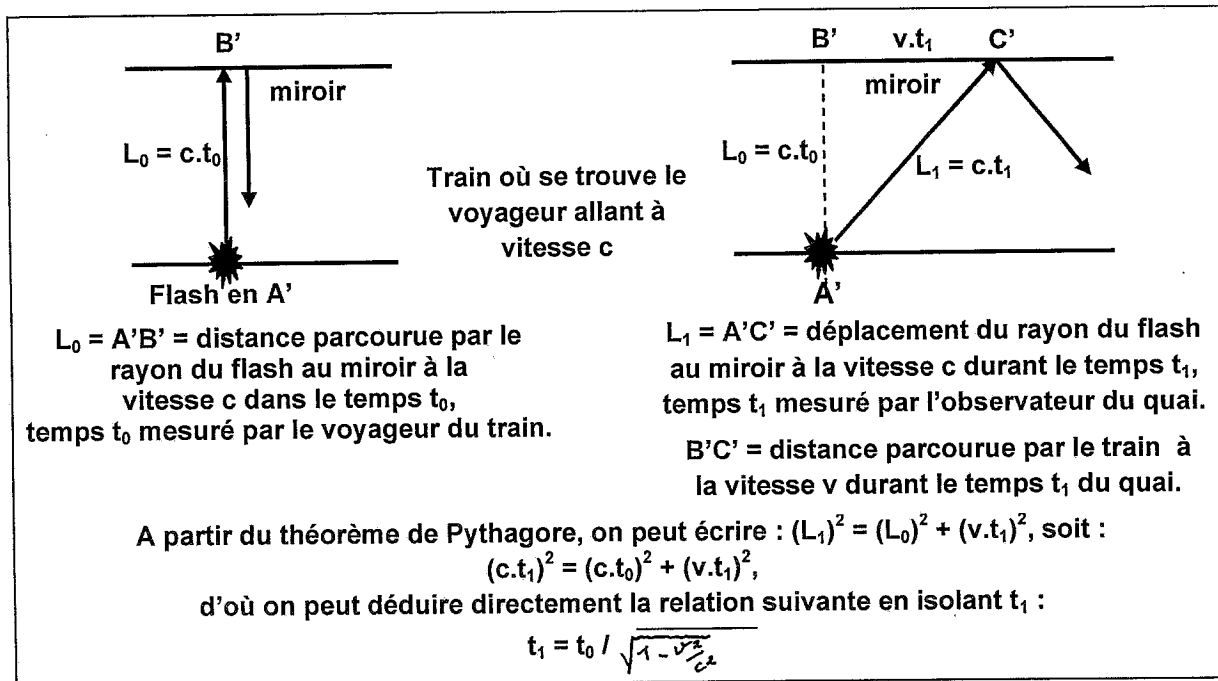
- des événements qui sont simultanés par rapport au quai de la gare ne sont pas simultanés par rapport au train, et inversement ;
- les mesures de longueurs effectuées dans les deux systèmes sont discordantes ;
- chaque corps de référence (train, quai) a son temps propre. Une indication de temps n'a de sens que si l'on indique le corps de référence auquel elle se rapporte. De même, une indication de distance n'a de sens que si l'on précise le corps de référence auquel la mesure de distance est effectuée.

- Le temps et l'espace en Relativité Restreinte : l'espace-temps

Reprenons le train et imaginons le voyageur braquant une lampe électrique sur un miroir fixé au plafond du compartiment qui renvoie la lumière vers la lampe. Le rayon tel que le voit le voyageur trace un simple aller et retour puisque ni la lampe ni le miroir ne se sont déplacés par rapport à lui.

Mais l'observateur du quai voit ce même trajet tout autrement (schéma page suivante). Pendant le laps de temps qu'il faut au rayon lumineux pour arriver au miroir, ce dernier se déplace d'une certaine distance, étant solidaire du train en mouvement. Il faut du temps au rayon pour effectuer le trajet aller

et retour, et la lampe pendant ce temps parcourt encore une fois la même distance. Pour un observateur situé sur le quai, le trajet de la lumière est plus long que le même trajet observé par le voyageur. Or nous savons que la vitesse de la lumière est la même pour ceux qui prennent le train que pour ceux qui restent sur le quai. Nous sommes donc amenés à conclure qu'il s'est écoulé, entre les instants d'émission et de réception de la lumière, plus de temps dans la gare que dans le train. L'observateur du quai constate que la montre du voyageur retarde par rapport à la sienne, retard qui augmente avec la vitesse du train. Si elle approche celle de la lumière, ce retard peut devenir très grand. Par exemple, pour un train filant à une vitesse différent de celle de la lumière que de 1/10.000, une heure de gare équivaut approximativement à une minute de train seulement.



La vitesse de la lumière apparaît ainsi comme une vitesse limite qu'aucun objet matériel ne peut dépasser.

Nous constatons que toute montre en déplacement retarde sur les montres en l'état de repos. Tout observateur immobile par rapport à sa montre voit les autres montres avancer si elles se meuvent par rapport à lui.

Ce résultat est-il paradoxal ? On peut répondre non, car la comparaison entre l'horloge du train et celles de la gare a eu lieu dans des conditions différentes. En fait, une seule horloge est nécessaire au voyageur du train alors que l'observateur du quai doit utiliser deux horloges pour effectuer une mesure du temps. Le voyageur a comparé les indications de sa montre avec deux horloges différentes de la gare.

Voyons maintenant du côté de l'espace. Nous avons déjà constaté que les mesures de distances effectuées à partir de corps de référence en mouvement l'un par rapport à l'autre sont discordantes. Dans notre exemple, on peut montrer que le quai est plus long lorsqu'il est mesuré par un observateur immobile par rapport à lui que lorsqu'il est mesuré à partir d'un train en mouvement par rapport à lui.

✗ **Tout corps en mouvement se contracte dans la direction de ce mouvement**, ce qui ne veut pas dire que cette contraction prouve le caractère absolu du mouvement. Il nous suffit de nous placer dans un système de référence immobile par rapport à l'objet étudié pour que celui-ci reprenne sa longueur propre. En réalité, ces discordances proviennent comme précédemment du fait que les procédés utilisés pour effectuer les mesures de longueurs sont nécessairement différents dans l'un et l'autre poste d'observation.

Les effets de contraction des longueurs dans un système en mouvement, et de retard des horloges mobiles, sont d'autant plus importants que la vitesse v des systèmes mobiles est importante. **Il faut noter que ces effets sont réciproques.** Ils apparaissent à tout observateur attaché à un système de

référence galiléen qui considère des systèmes mobiles par rapport à lui et animés de mouvements rectilignes et uniformes.

Ici encore, la vitesse de la lumière dans le vide apparaît comme une vitesse limite. On peut dire avec Landau (voir bibliographie, p. 53) que « l'existence de cette vitesse limite est inhérente à la nature même des choses ». C'est une propriété fondamentale de l'univers dans lequel nous vivons. Il est donc impossible pour les observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres de se mettre d'accord sur la distance spatiale et sur l'intervalle de temps séparant deux événements.

- Intervalle, ligne d'univers et cône de lumière

Existe-il une grandeur physique ayant une signification plus profonde, sur laquelle tous les observateurs pourraient se mettre d'accord, qui serait la même pour tous, en un mot qui serait invariante ? Cette grandeur existe : c'est « l'intervalle ». Ce n'est ni un intervalle d'espace, ni de temps, mais une combinaison des deux. C'est une grandeur qui fait intervenir à la fois l'espace et le temps, et nous oblige à considérer l'espace et le temps non plus séparément mais à l'intérieur d'une entité plus fondamentale : l'espace-temps.

L'observateur se déplace à la fois dans l'espace et dans le temps, et on parle alors de sa trajectoire dans l'espace-temps ou encore de sa « ligne d'univers ». Chaque observateur suit une ligne d'univers dans l'espace-temps. C'est un fait d'expérience que chacun des observateurs peut ordonner les événements qui se produisent en coïncidence avec lui, c'est-à-dire les événements qui rencontrent sa ligne d'univers. Chacun d'eux peut donc distinguer sur sa ligne le passé du présent et le présent de l'avenir.

La question qui se pose est de savoir comment cet observateur va ordonner les événements distants qui ne rencontrent pas sa ligne d'univers. On montre à l'aide de « l'intervalle » que ces événements se répartissent en trois catégories : 1) les événements dont l'ensemble forme le passé de l'observateur, 2) ceux dont l'ensemble forme le futur, 3) ceux enfin qui ne peuvent être atteints par aucune ligne d'univers passant par le point d'espace-temps où se trouve l'observateur. L'ensemble de ces événements forment la région de l'« ailleurs » pour l'observateur, et la surface qui sépare dans l'espace-temps ces trois régions est appelée « cône de lumière ». On en reparlera.

- La masse et l'énergie en Relativité Restreinte

La masse d'un objet est un concept très important en physique. On peut lui donner diverses définitions : par exemple, la **masse d'inertie** traduit la plus ou moins grande résistance que l'objet oppose lorsqu'on cherche à modifier son mouvement ; la **masse gravitationnelle** mesure l'intensité de l'attraction gravitationnelle que l'objet exerce sur les autres corps, et apparaît alors, d'une certaine manière, comme la mesure de la **quantité** de matière que renferme l'objet.

La Relativité Restreinte, là-encore, a obligé les physiciens à modifier les idées qu'ils avaient sur la notion de masse. On croyait avant Einstein qu'il y avait conservation de la masse, autrement dit qu'elle était invariable. Mais Einstein a montré que, pour des vitesses proches de celle de la lumière dans le vide, la masse des objets augmente, devenant infinie à cette vitesse. Ceci montre, une fois de plus, que la vitesse de la lumière dans le vide constitue une limite impossible à dépasser pour tout objet possédant une masse.

Enfin, le résultat le plus important que la théorie de la Relativité Restreinte a permis d'obtenir est le suivant : il est possible de transformer de la masse, donc de la matière, en énergie, et *vice versa*, selon la célèbre formule $E = mc^2$. C'est cette prédiction théorique qui a trouvé, entre autres, une confirmation éclatante – et dramatique – lors des explosions nucléaires.

Jean marie Wacrenier

Bibliographie : La Relativité, A. Einstein, Petite bibliothèque Payot, n° 62 (ce livre a été ~~révisé~~ réédité aussi chez Gauthier Villars). Qu'est-ce que la théorie de la Relativité ? L. Landau, Y. Roumer, Editions de Moscou. La Relativité, P. Couderc, Collection Que sais-je ? n° 37, Presses Universitaires de France. La gravitation, G. Gamow, Petite bibliothèque Payot, n° 52.