

ALBERT EINSTEIN

**La théorie de la relativité
restreinte et générale**

A black and white photograph of Albert Einstein, with his characteristic wild hair and mustache, is shown from the chest up. He is wearing a dark, textured jacket and is pointing his right hand towards a chalkboard. On the chalkboard, the equation $R_{ik} = 0$ is written in white chalk. The 'i' and 'k' in the subscript have small arrows pointing to them. The background is slightly blurred, showing the texture of the chalkboard and some faint markings.
$$R_{ik} = 0$$

Préface de
Marc Lachièze-Rey

DUNOD

Sur la notion de temps en Physique

Je suppose que la foudre ait frappé la voie de notre chemin de fer en deux points A et B très distants l'un de l'autre, et j'affirme que ces deux éclairs ont été «simultanés». Si maintenant je vous demande, cher lecteur, si cette affirmation a un sens, vous me répondez avec conviction « Oui ». Mais si j'insiste et vous prie de m'expliquer d'une façon plus précise le sens de cette affirmation, vous constatez après quelque réflexion que la réponse à cette question n'est pas si simple qu'elle paraît au premier abord.

Après quelque temps il vous viendra peut-être à l'esprit la réponse suivante : « Le sens de cette affirmation est clair en soi-même et n'a pas besoin d'autre éclaircissement; certes, il me faudrait réfléchir pendant un certain temps, si j'étais chargé d'établir par des observations, si dans le cas concret les deux événements sont simultanés ou non ». Cette réponse ne me satisfait pas pour les raisons suivantes. Supposons qu'un météorologiste ait trouvé par des réflexions pénétrantes que la foudre doit toujours tomber simultanément aux points A et B ; il nous faudrait alors vérifier si ce résultat théorique correspond ou ne correspond pas à la réalité. Il en est de même pour toutes les affirmations physiques où la notion de « simultané » joue un rôle. 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 donc 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. (Si vous ne m'accordez pas cela, cher lecteur, avec conviction, il est inutile de continuer.)

Après quelque temps de réflexion vous pourriez me faire la proposition suivante pour constater la simultanéité. On mesure la droite AB le long de la voie ferrée et l'on place au milieu de cette droite M un observateur muni d'un appareil (par exemple de deux miroirs inclinés à 90°) qui lui permet d'observer simultanément les deux points A et B. S'il aperçoit les éclairs en même temps, ils sont simultanés.

Je suis très satisfait de cette proposition, je ne peux cependant pas considérer la chose comme complètement éclaircie, parce que je me sens forcé à faire l'objection suivante : « Votre définition serait tout à fait correcte, si je savais déjà que la lumière, qui communique à l'observateur en M la perception des deux éclairs, se propage avec la même vitesse sur la droite $A \rightarrow M$ que sur la droite $B \rightarrow M$. Une vérification de cette supposition ne serait possible que si l'on disposait déjà d'un moyen de mesurer le temps. On paraît donc se mouvoir ici dans un cercle vicieux ».

Après quelques réflexions, vous me jetterez avec raison un regard quelque peu dédaigneux en déclarant : «Je maintiens quand même ma définition de tout à l'heure, puisqu'en réalité elle ne présume rien de la lumière. La définition de la simultanéité ne doit remplir qu'une seule condition, de nous fournir dans chaque cas réel un moyen empirique pour décider si le concept à définir est confirmé ou n'est pas confirmé. Il est indiscutable que ma définition remplit cette condition. Affirmer que la lumière met le même temps à parcourir la droite $A \rightarrow M$ que la droite $B \rightarrow M$ n'est pas en réalité une supposition ou une hypothèse sur la nature physique de la lumière, mais une convention que je peux faire librement, pour parvenir à une définition de la simultanéité. »

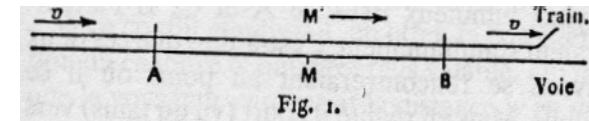
Il est clair que cette définition peut être employée non seulement pour donner un sens exact à la simultanéité de deux événements, mais d'un nombre quelconque d'événements, quelle que soit la position relative des lieux où ils se produisent par rapport au corps de référence (ici le talus)¹. Par là on arrive à une définition du « temps » en Physique. Qu'on imagine en effet placées aux points A, B, C de la voie ferrée (système de coordonnées)

des horloges de même construction et réglées de telle sorte que les positions respectives de leurs aiguilles soient simultanées (dans le sens de plus haut). On entend alors par le « temps » d'un événement l'indication (position des aiguilles) de l'horloge immédiatement voisine de l'événement. À chaque événement est ainsi associée une valeur du temps qui est en principe observable.

Cette convention contient encore une hypothèse physique dont la validité ne peut être mise en doute, puisque aucune preuve empirique ne vient l'infirmier. Il est, en effet, supposé que toutes ces horloges « marchent au même rythme » si elles sont de même construction. En termes plus précis : Si deux horloges au repos en des endroits différents du corps de référence sont réglées de telle sorte que la position des aiguilles de l'une et la position des aiguilles de l'autre sont simultanées (dans le sens de plus haut), alors des positions égales d'aiguilles sont toujours simultanées.

La relativité de la simultanéité

Jusqu'à présent notre réflexion avait en vue un corps de référence particulier, que nous désignons par la « voie ferrée ». Supposons un train très long se déplaçant sur cette dernière avec une vitesse constante v dans la direction indiquée sur la figure 1.



Les voyageurs de ce train auront avantage de se servir du train comme corps de référence rigide (système de coordonnées), auquel ils rapporteront tous les événements. Tout événement qui a lieu le long de la voie ferrée a aussi lieu en un point déterminé du train. La définition de la simultanéité peut aussi être formulée exactement de la même façon par rapport au train que par rapport à la voie. La question suivante se pose ainsi tout naturellement:

Deux événements (par exemples les deux éclairs A et B), qui sont simultanés *par rapport à la voie*, sont-ils aussi simultanés *par rapport au train* ? Nous montrerons tout à l'heure que la réponse doit être négative.

Quand nous disons que les éclairs A et B sont simultanés par rapport à la voie ferrée nous entendons par là que les rayons issus des points A et B se rencontrent au milieu M de la distance A-B située sur la voie. Mais aux événements A et B correspondent des endroits A et B dans le train. Soit M' le milieu de la droite A-B du train en marche. Ce point M' coïncide bien avec le point M à l'instant où se produisent les éclairs¹, mais il se déplace sur le dessin vers la droite avec la vitesse v . Si un observateur dans le train assis en M' n'était pas entraîné avec cette vitesse, il resterait d'une façon permanente en M et les rayons lumineux issus de A et de B l'atteindraient simultanément,

1. Nous supposons, en outre, que si trois événements A, B, C ont lieu en trois endroits différents de telle sorte que A et B ainsi que B et C sont simultanés (simultanés dans le sens de la définition de plus haut), le critérium de la simultanéité des deux événements A-C est également vérifié. Cette supposition est une hypothèse physique concernant la loi de la propagation de la lumière; elle doit être absolument vraie, si l'on veut avoir une possibilité de conserver la loi de la constance de la vitesse de la lumière dans le vide.

La relativité de la notion de distance spatiale

c'est-à-dire que ces deux rayons se rencontreraient au point où il se trouve. Mais en réalité il court (vu du talus) vers le rayon de lumière venant de B, tandis qu'il fuit devant celui qui vient de A. Il verra, par conséquent, le rayon de lumière qui vient de B plus tôt que celui qui vient de A. Les observateurs qui se servent du train comme corps de référence doivent donc arriver à la conclusion que l'éclair B s'est produit antérieurement à l'éclair A. Nous aboutissons ainsi au résultat important suivant:

Des événements qui sont simultanés par rapport à la voie ferrée ne sont pas simultanés par rapport au train et inversement (relativité de la simultanéité). Chaque corps de référence (système de coordonnées) 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.

Avant la Théorie de la relativité la Physique a toujours tacitement admis que l'indication du temps avait une valeur absolue, c'est-à-dire qu'elle était indépendante de l'état de mouvement du corps de référence. Mais nous venons de montrer que cette supposition est incompatible avec la définition si naturelle de la simultanéité ; si on la rejette, le conflit, exposé au chapitre 7, entre la loi de la propagation de la lumière dans le vide et le principe de relativité disparaît.

À ce conflit conduirait, en effet, la considération du chapitre 6, qui n'est plus valable. Du fait que le voyageur parcourait la distance w en une seconde, par rapport au wagon, nous avons conclu qu'il parcourait cette distance également en une seconde par rapport à la voie. Mais puisque, d'après les réflexions que nous venons de faire, la durée d'un événement déterminé par rapport au wagon ne peut pas être égale à la durée de cet événement par rapport à la voie considérée comme corps de référence, on ne peut pas soutenir que le voyageur en marchant a parcouru la distance w relativement à la voie dans un temps qui – mesuré de la voie – est égal à une seconde.

Le raisonnement du chapitre 6 repose encore sur une autre supposition qui, à la lumière d'une réflexion attentive, paraît arbitraire, bien qu'elle ait toujours été faite (tacitement) avant la construction de la Théorie de la relativité.

Considérons deux points déterminés du train¹ qui se déplace avec la vitesse v le long du talus, et demandons-nous quelle est leur distance. Nous savons déjà que pour mesurer une distance on a besoin d'un corps de référence, par rapport auquel la distance est mesurée. Le plus simple est d'utiliser le train même comme corps de référence (système de coordonnées). Un observateur dans le train mesure la distance en portant sa règle de mesure en ligne droite le long des planchers des wagons autant de fois qu'il est nécessaire pour que, parti de l'un des points marqués, il arrive à l'autre. Le nombre qui indique combien de fois il a fallu porter la règle représente la distance cherchée.

Il en est tout autrement quand il s'agit de mesurer cette distance en se plaçant sur le talus. La méthode suivante peut alors être employée.

Appelons les deux points du train, dont il s'agit de déterminer la distance et qui se déplacent le long du talus avec la vitesse v , A' et B' . Nous demandons d'abord quels sont les points A et B du talus devant lesquels les points A' et B' passent à un moment donné t (par rapport au talus). Ces deux points A et B du talus peuvent être déterminés grâce à la définition du temps donnée au chapitre 8. On mesure alors la distance de ces points AB en portant un certain nombre de fois l'unité de mesure le long du talus.

Il n'est pas du tout prouvé *a priori* que cette dernière mesure donnera le même résultat que la première. La longueur du train, mesurée sur le talus, peut être différente de celle mesurée dans le train même. Cette circonstance soulève une seconde objection contre le raisonnement, en apparence si évident, du chapitre 6. Si le voyageur parcourt dans le wagon la distance w dans l'unité de temps, *mesurée dans le train*, cette distance n'est pas nécessairement égale à w quand elle est *mesurée sur le talus*.

1. Vus du talus.

1. Par exemple, le milieu du premier et celui du centième wagon.