

## Documents sur la relativité restreinte

Abréviations :

JHMC : Jean Hladik et Michel Chrysos, *Introduction à la relativité restreinte*, Dunod, 2001

E. : Albert Einstein, *La relativité*, Payot 2001 (réédition)

S.M. : Stamatia Mavridès, *La relativité*, « Que sais-je », PUF.

M.P. : Michel Paty, *Einstein Philosophe*,

Einstein

« La théorie de la relativité restreinte n'est rien d'autre que la réunion non contradictoire des résultats de l'électrodynamique de Maxwell-Lorentz et de ceux de la mécanique classique » (Einstein, manuscrit 1920, cité in Paty, 77-78).

« La relativité a changé radicalement les notions d'espace et de temps considérés jusqu'en 1905, comme des catégories indépendantes. Or, c'est la combinaison de l'espace et du temps qui est la réalité. Dans le monde auquel la relativité nous a conduits, espace et temps sont physiquement liés » (p.3)

JHMC

« Le cadre newtonien de l'espace absolu forme une sorte de scène infinie à trois dimensions dans laquelle se déroulent au cours du temps absolu les phénomènes physiques, le physicien mesurant et théorisant le spectacle. Mais à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'électromagnétisme posa aux scientifiques le problème de son adéquation aux postulats fondamentaux de Newton sur l'espace et le temps. En réponse à cette interrogation, il en résulta une remise en cause de ces principes mêmes par la théorie de la relativité.

En 1905, la relativité restreinte créa un nouveau cadre infini à quatre dimensions. L'espace en lui-même et le temps en lui-même s'évanouissent, et seule l'union des deux devient la nouvelle scène formant l'espace-temps. Ce cadre redoré devient alors un nouvel absolu, ce qui conduira par la suite à une rénovation du modèle par la théorie de la relativité générale. En fait cette dernière va aller beaucoup plus loin en réalisant une théorie du cadre lui-même, l'espace-temps riemannien, en relation très étroite avec son contenu matériel. » (JHMC, p. IX)

Einstein

« Si, sans trop me faire scrupule et sans entrer dans des explications détaillées, je définis la tâche de la Mécanique dans les termes suivants : *La Mécanique doit décrire comment les corps changent de lieu avec le temps*, je charge ma conscience de quelques péchés mortels contre le saint esprit de la clarté, et ces péchés doivent tout d'abord être dévoilés.

Il n'est pas clair ce qu'il faut ici entendre par « lieu » et « espace ». Supposons que, me trouvant devant la fenêtre d'un wagon d'un train en marche uniforme, je laisse tomber, sans lui imprimer une impulsion, une pierre sur le talus. Je vois alors (abstraction faite de l'influence exercée par la résistance de l'air) la pierre tomber en ligne droite. Mais un piéton qui observe le méfait du sentier constate que la pierre dans sa chute décrit une parabole. Je demande maintenant : Les « lieux » que la pierre parcourt sont-ils « réellement » situés sur une droite ou sur une parabole ? Que signifie ici, en outre, mouvement dans « l'espace » ? La réponse, d'après les réflexions du chapitre précédent, s'entend d'elle-même. Laissons tout d'abord de côté le terme obscur « espace » par lequel — avouons-le honnêtement — nous ne pouvons absolument rien nous représenter. À sa place nous mettons « mouvement par rapport à un corps de référence pratiquement rigide ». Les lieux par rapport au corps de référence (wagon ou sol) ont déjà été définis d'une façon détaillée dans le chapitre précédent. En mettant à la place de « corps de référence » la notion de « système de coordonnées », qui est utile pour la description mathématique, nous pouvons dire : La pierre décrit, par rapport à un système de coordonnées rigidement lié au wagon, une droite, mais par rapport à un système de coordonnées rigidement lié au sol une parabole. Cet exemple montre clairement qu'il n'y a pas de trajectoire en soi, mais seulement une trajectoire par rapport à un corps de référence déterminé.

Une description *complète* du mouvement est réalisée seulement quand on indique comment le corps change de place *avec le temps*, c'est-à-dire qu'il faut indiquer pour chaque point de la trajectoire à quel moment le corps s'y trouve. Ces indications doivent être complétées par une définition du temps telle que ces valeurs du temps puissent, en vertu de cette définition, être considérées en principe comme des grandeurs observables (résultats de mesures). Nous satisfaisons dans notre cas à cette exigence — en restant sur le terrain de la Mécanique classique — de la manière suivante. Nous imaginons deux montres constituées exactement de la même façon, dont l'une est possédée par l'homme qui se trouve devant la fenêtre du wagon et l'autre par l'homme qui se trouve sur la voie. Chacun d'eux établit à quel endroit, par rapport à son corps de référence, se trouve justement la pierre quand sa montre indique un temps déterminé. Nous renonçons ici à tenir compte de l'inexactitude due à la propagation de la lumière avec une vitesse finie. Nous en parlerons, ainsi que d'une autre difficulté qui se présente ici, plus loin d'une façon détaillée. » (Einstein, *La relativité*, p. 19-20)

## JHMC

« Le mouvement d'un corps qui n'est soumis à l'action d'aucune force extérieure est appelé un *mouvement libre*. Lorsque le mouvement libre d'un corps s'effectue à vitesse constante par rapport à un référentiel, on dit que celui-ci est un *système de référence d'inertie* ou *galiléen*. Si un système de référence est d'inertie, alors tout autre référentiel se déplaçant d'un mouvement rectiligne à vitesse constante par rapport au premier est également un référentiel d'inertie (puisque tout mouvement libre y est également rectiligne uniforme). À un référentiel d'inertie donné correspond donc une infinité d'autres référentiels d'inertie.

Considérons deux référentiels d'inertie, R et R', en translation relative uniforme l'un par rapport à l'autre, le mouvement s'effectuant parallèlement aux axes  $Ox$  et  $Ox'$  (Fig. 1.1). Le terme *translation* désignera désormais un mouvement rectiligne

Le référentiel R' se déplace à la vitesse  $V$  par rapport au référentiel R, dans le sens des  $x$  et  $x'$  positifs. De plus, on suppose que le point  $O'$  de R' est passé au temps  $t = 0$  au point  $O$ .

Temps absolu. En mécanique classique, on n'a pas besoin de préciser qu'une horloge est attachée à chaque système de coordonnées car on suppose, de manière implicite, qu'il existe une grande horloge universelle du temps. Quel que soit le référentiel utilisé, le temps est supposé s'écouler de manière identique en chaque point de l'espace et pour tous les référentiels. Ce fut Newton qui introduisit le *temps absolu* et universel ». (JHMC, p.2)

## Einstein

« On sait que la loi fondamentale de la mécanique de Galilée-Newton, connue sous le nom de loi de l'inertie, est exprimée dans les termes suivants : un corps suffisamment éloigné d'autres corps persiste dans son état de repos ou de mouvement rectiligne et uniforme » (*La relativité*, p.23)

« Ce n'est que pour les systèmes de coordonnées galiléens que les lois de Galilée-Newton sont valables » (Einstein, p. 24).

« si une masse  $m$  en mru par rapport à un système  $K$ , elle effectue aussi un mru relativement à  $K'$ , si ce dernier est en mru relativement à  $K$ . (cf. p.25-26) »

« relativement à  $K'$ , les lois de la mécanique sont aussi vraies que par rapport à  $K$  » (E. 26)

« Les phénomènes de la nature se déroulent, relativement à  $K'$ , conformément aux mêmes lois générales que relativement à  $K$ . Nous appelons cet énoncé « principe de relativité » (dans le sens restreint) » (E.26)

## Les trois lois de Newton : (axiomes et lois du mouvement, introduction des *Principia*)

Première loi : « Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins que des forces imprimées ne le contraignent à changer son état.

Seconde loi : « Le changement du mouvement est proportionnel à la force motrice imprimée et se fait suivant la droite par laquelle cette force est imprimée » (c'est cette loi qui est en général traduite par  $F = m\gamma$  (en réalité  $F\Delta t = m\Delta v$ ))

Troisième loi : L'action est toujours égale et opposée à la réaction : c'est-à-dire que les actions mutuelles de deux corps sont toujours égales et dirigées en sens contraire. »

« Le temps absolu vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément et s'appelle durée » (*Principes*, liv.I, scholie, p.10).

« L'espace absolu, sans relation aux choses extérieures, demeure toujours similaire et immobile » (*Principes*, liv.I, scholie, p.8).

## Einstein

« si une masse  $m$  en mru par rapport à un système  $K$ , elle effectue aussi un mru relativement à  $K'$ , si ce dernier est en mru relativement à  $K$ . (cf. p.25-26) »

Si  $K$  est un système galiléen, tout système  $K'$  en mru par rapport à lui est un système galiléen ; « relativement à  $K'$ , les lois de la mécanique sont aussi vraies que par rapport à  $K$  » (E. 26)

« Les phénomènes de la nature se déroulent, relativement à  $K'$ , conformément aux mêmes lois générales que relativement à  $K$ . Nous appelons cet énoncé « principe de relativité » (dans le sens restreint) » (E.26)

## Newton

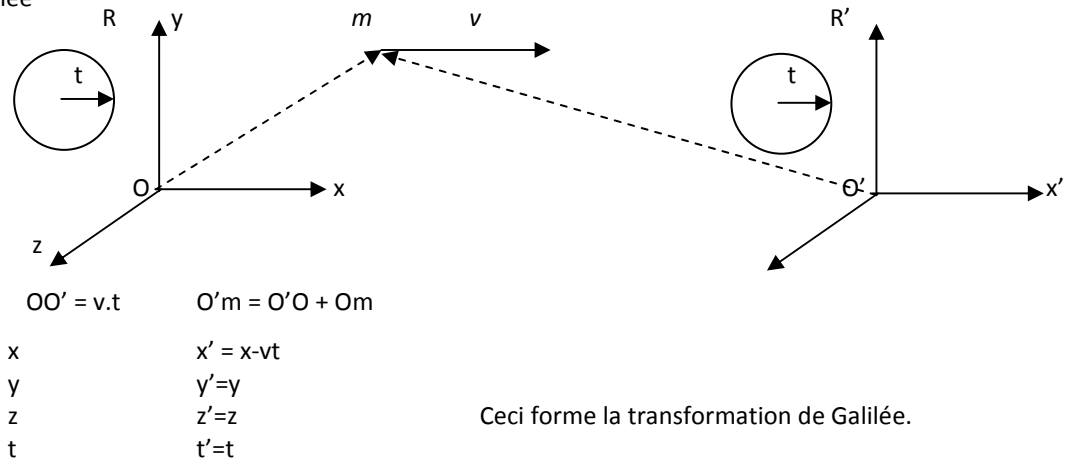
« Le temps absolu vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément et s'appelle durée » (*Principes*, liv.I, scholie, p.10).

« L'espace absolu, sans relation aux choses extérieures, demeure toujours similaire et immobile » (*Principes*, liv.I, scholie, p.8).

## Euler

« l'espace absolu est le garant de la validité du principe d'inertie » (cité in Einstein, p.12). L'espace absolu newtonien n'est donc pas l'espace de la géométrie ; comme celui-ci, il est vide, homogène, isotrope, mais il a des actions sur les corps ; en effet, il est le cadre d'existence et d'action des forces réelles et donc des causes à l'œuvre dans le monde physique.

## La transformation de Galilée



Si on connaît un système d'inertie, on peut en déduire d'autres (en MRU par rapport au premier), à une vitesse  $v$ . Un événement associé à un corps ou un phénomène est un couple (position, instant) où il advient. Ce sont quatre coordonnées. Dans un système en MRU on a :

### Einstein

« Supposons que le train dont nous avons déjà souvent parlé marche à une vitesse constante  $v$  et qu'un homme se déplace dans un des wagons dans le sens de sa longueur, c'est-à-dire dans le sens de la marche du train avec la vitesse  $w$ . Combien rapidement ou avec quelle vitesse  $W$  l'homme avance-t-il dans sa marche relativement au talus ? La seule réponse possible semble résulter de la réflexion suivante :

Si l'homme restait immobile pendant une seconde, il avancerait, relativement au talus, d'une longueur  $v$  égale à la vitesse du wagon. Mais en réalité il parcourt dans cette seconde, relativement au wagon et par conséquent aussi relativement au talus, la longueur  $w$ , qui est égale à la vitesse de sa marche. Il parcourt donc au total pendant cette seconde, relativement au talus, la longueur  $W=v+w$ .

Nous verrons plus tard que ce résultat, qui exprime le théorème de l'addition des vitesses de la Mécanique classique, ne peut pas être maintenu, que, par conséquent, la loi que nous venons d'écrire n'est pas tout à fait exacte. Pour le moment, cependant, nous voulons supposer qu'elle est vraie. » (Einstein, p.31-32)

« Les papillons volent de la même manière dans le navire voguant sur les flots et à vitesse constante et dans le navire au repos à quai » (F.Balibar, *Philosophie 1*, p.73).

### JHMC

« Toutes les observations montrent l'existence d'un principe de relativité selon lequel toutes les lois de la mécanique sont identiques dans tous les référentiels d'inertie » (JHMC, p.2)

### Einstein

« tant qu'on était convaincu que tous les phénomènes de la nature peuvent être représentés à l'aide de la mécanique classique, on ne pouvait douter de la validité de ce principe » (Einstein, 26)

« Qu'un principe d'une si grande généralité soit valable avec une telle exactitude pour un ordre de phénomènes, mais en défaut pour un autre, ceci est *a priori* peu probable » (E. 27).

« On serait alors porté à croire que ces lois de la nature ne pourraient être formulées d'une manière particulièrement simple et naturelle que si, entre tous les systèmes de coordonnées galiléens, on choisissait comme corps de référence un d'entre eux ( $K_0$ )... Nous devrions considérer celui-ci, à cause des avantages qu'il représente comme étant « au repos absolu » (E.27).

### Einstein

« d'après ce principe, la loi de propagation de la lumière devrait, comme toute autre loi générale de la nature, être la même, soit qu'on choisisse le wagon, soit qu'on choisisse la voie ferrée comme corps de référence » (E. 35)

### JHMC

« Le postulat d'invariance de la vitesse de la lumière d'Einstein est à la fois inutile et surtout nuisible à la bonne compréhension et à l'acceptation des résultats concernant la relativité » (p.IX).

### Jean-Marc Levy-Leblond

Pourtant, la démarche heuristique d'Einstein, toute couronnée de succès et justifiée historiquement qu'elle ait pu être, n'est guère satisfaisante sur le plan épistémologique. La principale critique que l'on peut lui adresser est d'établir ce que nous avons appelé une « super-loi » appelée à régir *tous* les phénomènes physiques en définissant leur cadre spatio-temporel commun à partir des propriétés d'un agent physique particulier : comment comprendre,

dans une telle perspective que la relativité einsteinienne, fondée sur l'analyse de la seule propagation de la lumière, ait vocation à s'appliquer aux interactions nucléaires, de nature pourtant essentiellement différente- et y soit effectivement valide ? (*Aux contraires*, Gallimard, 1996)

Einstein

« L'hypothèse de l'éther forme une partie essentielle de l'image de l'univers qui se présenta aux yeux des physiciens du siècle dernier » (Einstein, 1910, in Paty, p.92)

« L'optique avait supposé qu'il y a dans le monde un état de mouvement qui se distingue de tous les autres, c'est-à-dire celui de l'éther lumineux. C'est à cet éther lumineux que devraient être rapportés tous les mouvements des objets corporels ; l'éther lumineux même apparaît comme une incarnation de la notion vide en soi de repos absolu » (Einstein, 1920, in Paty, n.1, p.93)

Comme de juste, les possibilités étaient plus complexes : on avait une théorie de l'éther partiellement entraîné par les corps en mouvement (expérience de Fizeau) et une théorie de l'éther vraiment immobile (une sorte de *cadre mathématique* pour les équations de Maxwell), défendue par Lorentz.

Maxwell

Remplir l'espace 'un nouveau milieu toutes les fois que l'on doit expliquer un nouveau phénomène ne serait point un procédé bien philosophique. Au contraire, si étant arrivé par deux branches indépendantes de la science à l'hypothèse 'un milieu, les propriétés qu'il faut attribuer à ce milieu pour rendre compte des phénomènes électromagnétiques se trouvent être de la même nature que celles que nous devons attribuer à l'éther lumineux pour expliquer les phénomènes de la lumière, nos raisons physiques de croire à l'existence d'un pareil milieu se trouveront ainsi confirmées » (in Taton 3, p.185)

M.A. Tonnelat

« Les polémiques se concentrent sur le point suivant : il paraît légitime d'espérer que l'expérience va manifester au moins la plus indispensable des propriétés de l'éther : celle de constituer un milieu matériel qui baigne les corps en mouvement et dont la cinématique soit en accord avec les principes classiques. Les mouvements des corps matériels devraient produire des effets de « vent d'éther ». (M.A. Tonnelat, p.189)

Description de ces deux expériences : JHMC, p.5-6

**Fizeau** : « L'expérience réalisée par Hippolyte Fizeau, en 1851, partait de l'idée que si un milieu réfringent était en mouvement, on pouvait penser que l'éther lumineux serait entraîné par ce milieu. La vitesse de la lumière devait alors résulter de l'addition de la vitesse de la lumière dans l'éther et de celle de l'éther éventuellement entraîné. Afin de mettre en évidence un entraînement de l'éther, Fizeau étudia l'influence de la vitesse  $V$  d'un courant d'eau sur la vitesse de la lumière. Le principe de l'expérience est décrit par la figure 1.2. De l'eau circule dans un tube coudé en verre dont les deux branches parallèles sont de même longueur. Deux rayons lumineux issus d'une même source ponctuelle  $S$ , donc en phase au départ, sont envoyés à l'aide d'une lame semi-transparente, à travers les deux branches du tube. Les trajets parcourus par les rayons sont de même longueur ; ils sont renvoyés par un miroir  $M$ , et ils viennent interférer en  $I$  en fin de parcours.

Lorsque l'eau est immobile, la vitesse de la lumière est égale à  $c' = c/n$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $n$ , l'indice de l'eau. Si l'on suppose que l'éther lumineux est un milieu entraîné par le courant d'eau, la vitesse du rayon lumineux marqué par des flèches simples devrait être égale à  $c/n + V$ , et l'autre, marqué par des flèches doubles, à  $c/n - V$ . Les chemins optiques suivis par les deux rayons qui interfèrent sont donc différents, et l'on

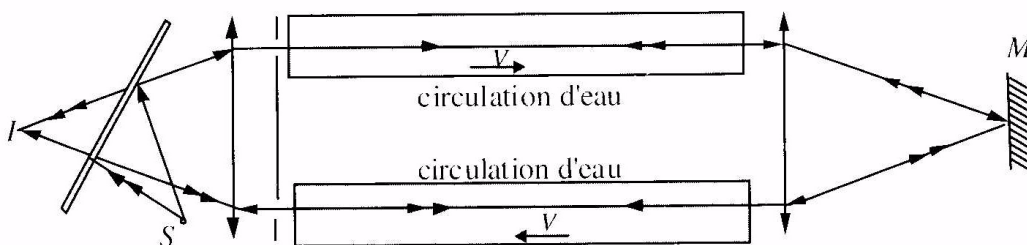


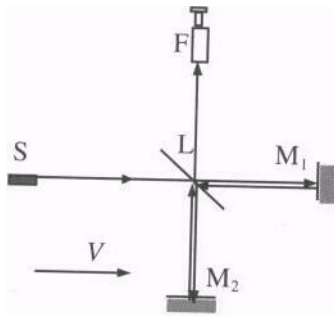
Figure 1.2

devrait observer un déplacement des franges d'interférence en fonction de la vitesse de l'eau.

Fizeau observa bien un déplacement des franges d'interférence, mais les résultats expérimentaux montrèrent que la vitesse de la lumière dans un courant d'eau allant dans un même sens que le rayon lumineux, est donnée par l'expression :  $c'' = c/n + (1-1/n^2)V$ ,

L'éther n'est donc pas complètement entraîné par l'eau puisque la formule d'addition des vitesses de la relativité galiléenne n'est pas vérifiée.

### Expérience de Michelson et Morley



Dans cette expérience (Fig. 1.3), la lumière qui provient d'une source S est divisée en deux rayons par une lame semi-transparente L. Ces deux rayons cheminent perpendiculairement l'un à l'autre jusqu'aux miroirs  $M_1$  et  $M_2$ . Là, ils sont réfléchis et renvoyés sur la lame L, d'où ils partent réunis vers la lunette d'observation F, où ils interfèrent. Si les distances  $LM_1$  et  $LM_2$  sont égales, et si l'on place le bras de l'appareil portant le miroir  $M_1$  dans la direction du mouvement terrestre sur son orbite autour du Soleil, les deux rayons devraient avoir des vitesses différentes, selon la loi galiléenne d'addition des vitesses.

Les interférences étant caractérisées par des bandes alternativement sombres et lumineuses, celles-ci devraient alors être déplacées d'une certaine distance. Or, on ne trouva pas la moindre trace du déplacement attendu. Par la suite, l'expérience fut répétée avec des perfectionnements raffinés. Rien n'y fit, aucun déplacement ne fut décelé.

Hypothèse de Fitzgerald et Lorentz :

« Tout corps en MRU avec une vitesse  $v$  subit une contraction dans la direction  $v$ , donnée par  $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$  »

« Augmentation de la masse avec la vitesse :  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$  »

« Dilatation de durée des phénomènes par rapport à leur durée évaluée dans l'éther »,  $t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

Paty

« Il existe un éther. Mais il est indécélable parce que les corps en mouvement subissent une contraction de leur longueur. Cette contraction est elle-même indécélable à cause de l'augmentation de la masse avec la vitesse et de la diminution des durées dans un système en mouvement par rapport à l'éther. La transformation de Lorentz assure cette indétectabilité. H. Poincaré montre d'ailleurs que l'ensemble des phénomènes électromagnétiques demeurent invariants dans une transformation de Lorentz. On peut donc énoncer un principe de relativité restreinte pour cette catégorie de phénomènes « les lois de l'électromagnétisme ont la même forme dans deux systèmes de référence en MRU liés par la transformation de Lorentz ».

Poincaré a entamé son article de 1905 ainsi : « Il semble que cette impossibilité de mettre en évidence expérimentalement le mouvement absolu de la terre soit une loi générale de la nature ; nous sommes naturellement portés à admettre cette loi que nous appellerons le *Postulat de relativité* et à l'admettre sans restriction » (Paty, 49)

JHMC, (p.X)

« Un aperçu historique de la relativité enrichit fortement l'esprit et montre également comment s'élaborent difficilement les théories scientifiques. On est également étonné en découvrant que les travaux de Poincaré sur la relativité restreinte sont peu connus contrairement à ceux d'Einstein. Cependant, avec un certain recul historique, la théorie relativiste est de plus en plus souvent considérée comme ayant Poincaré et Einstein pour cofondateurs. Les historiens des sciences ont encore en ce domaine quelques travaux novateurs à effectuer. »

Einstein

« Il devint de plus en plus manifeste que la mécanique classique était une base insuffisante pour la description de tous les phénomènes physiques. Par là, la question se posa de la validité du principe de relativité, et il ne paraissait pas exclu que la réponse pourrait être négative » (E.26)

Maxwell (1831-1879)

Toute particule environnante est soumise à deux forces  $F_e$  la force électrique et  $F_m$  et la force totale, force de Lorenz est donnée par  $F = F_e + F_m$ .

« La force de Lorentz n'obéit pas au principe de relativité galiléenne » (c'est insensible si  $v \ll c$ ).

JHMC

« A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les physiciens s'interrogèrent donc sur l'absence de vérification du principe de relativité galiléenne par la théorie électromagnétique, ainsi que sur les mesures mettant en évidence la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels d'inertie. Il semblait difficile d'imaginer que les équations de Maxwell étaient fausses, mais pouvait-on admettre qu'elles ne soient pas de forme invariante vis-à-vis de la transformation de Galilée ?

Le postulat de relativité galiléenne ne devait-il pas être, sinon abandonné, tout au moins affiné et réadapté ? C'est ce qui allait être fait progressivement grâce aux travaux de Lorentz, Poincaré et Einstein. » (JHMC, p.13)

Einstein

« Des exemples, ainsi que des expériences entreprises pour démontrer le mouvement de la Terre par rapport au « milieu où se propage la lumière », font naître la conjoncture que ce n'est pas seulement dans la mécanique qu'aucune propriété des phénomènes ne correspond à la notion de mouvement absolu, mais aussi dans l'électrodynamique » (Einstein, 2<sup>d</sup> § de 1905, in Paty, 55).

JHMC

« La transformation de Galilée nous semble naturelle parce qu'elle est une transposition mathématique de notre perception immédiate. Il en est de même en ce qui concerne la loi d'addition des vitesses. Admettre que cette loi ne soit pas vérifiée parla lumière, mais conduite à la notion de vitesse limite, échappe à notre sensibilité car nous n'avons aucune expérience sensible des très grandes vitesses, de l'ordre de celle de la lumière. Seules la réflexion et la logique vont nous permettre d'explorer les propriétés de notre monde qui échappent à nos sens.

L'expérimentation vient contredire nos idées habituelles sur l'addition des vitesses. Or la vitesse est définie à partir du rapport entre deux intervalles, l'un d'espace, l'autre de temps. Ce sont donc *a priori* les propriétés de l'espace et du temps qui sont impliquées dans cette nouvelle loi de la nature. Les notions newtoniennes d'espace et de temps absolus vont devoir être remises en cause. » (JHMC, p.25)

Einstein

« En présence de ce dilemme il paraît inévitable, ou bien d'abandonner le principe de relativité, ou bien la loi simple de la propagation de la lumière dans le vide. Le lecteur qui a suivi attentivement notre exposé jusqu'à présent s'attendra certainement à ce que le principe de relativité, qui apparaît à l'esprit si naturel, si simple et presque inéluctable^ soit maintenu, mais que la loi de la propagation de la lumière dans le vide soit remplacée par une autre plus compliquée, qui soit compatible avec le principe de relativité. Mais le développement de la physique théorique a montré que ce chemin n'était pas praticable. Les recherches théoriques extrêmement originales de H. A. Lorentz sur les phénomènes électrodynamiques et optiques présentés par les corps en mouvement montrèrent en effet que les expériences dans ce domaine conduisent nécessairement à une théorie des phénomènes électromagnétiques qui a comme conséquence inévitable la constance de la vitesse de la lumière dans le vide. C'est pourquoi les théoriciens de marque étaient plutôt portés à rejeter le principe de relativité, bien qu'on n'ait pu trouver aucune expérience qui la contredise.

Einstein

C'est ici qu'intervient la théorie de la relativité. Par une analyse des notions physiques de temps et d'espace, elle montra *qu'en réalité il n'y a aucune incompatibilité entre le principe de relativité et la loi de la propagation de la lumière* et que, tout au contraire, en maintenant fermement et systématiquement ces deux principes on arrive à une théorie logique qui est à l'abri de toute objection. Nous appelons cette théorie, pour la distinguer de la théorie plus générale que nous traiterons plus loin, «Théorie de la relativité restreinte », dont nous allons exposer les idées fondamentales. » (Einstein, p.35-36)

Dans l'article de 1905, Einstein annonce ceci :

« ...On peut arriver à construire une électrodynamique des corps en mouvement simple et exempte de contradictions. On verra que l'introduction d'un « éther lumineux » devient superflue par le fait que notre conception ne fait aucun usage d'un « espace absolu au repos », doué de propriétés particulières. » (Einstein, in Paty, 56)

(JHMC, p.26-27)

« Nous venons de voir, au cours du premier chapitre, que les lois de la mécanique classique sont invariantes dans tous les référentiels d'inertie. Doit-il en être de même pour les lois de l'électromagnétisme ? Les phénomènes étudiés étant différents, il peut sembler que rien n'impose *a priori* une même propriété d'invariance, un principe de relativité.

Cependant une exigence fondamentale guide toute la pensée scientifique : le but de la science étant la découverte des lois de la nature, ces lois doivent être exprimées sous la forme la plus générale possible, valable pour tous et dans toutes les circonstances.

Remarquons que cette exigence d'universalité repose sur le postulat de l'existence de lois physiques, celles-ci étant supposées valides de tout temps et en tous lieux. Un Univers sans lois semble en effet difficilement concevable.

D'autre part, tous les énoncés des lois physiques portent sur des résultats de mesures et renvoient à ceux-ci. Mais dès l'instant où l'on veut effectuer des mesures, il faut utiliser un système de référence. Les grandeurs qui caractérisent l'état d'un système ne peuvent jamais être définies de manière absolue mais seulement relativement à un autre système. Elles n'ont pas d'existence par elles-mêmes mais seule la relation entre deux systèmes possède un sens physique.

Postuler qu'il existe des lois physiques c'est, de manière implicite, admettre qu'elles sont valides dans *tous* les systèmes de référence. C'est l'extension maximale du principe de relativité qu'Albert Einstein mettra en œuvre lorsqu'il posera les fondements de la relativité générale, en 1915.

La relativité restreinte, quant à elle, se borne à considérer le principe de relativité uniquement pour les référentiels d'inertie. C'est Henri Poincaré qui, en 1904, énonça clairement pour la première fois le<sup>1</sup> : [...] principe de la relativité, d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement de translation uniforme.

C'est une extension du principe de relativité non seulement à la théorie de l'électromagnétisme mais à toutes les théories physiques, tout en étant restreint aux référentiels d'inertie. Ce principe, postulant que la forme des lois doit être invariante dans tous les référentiels d'inertie, est également appelé *principe d'invariance* »

Einstein, p.37-38

« 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.) »

« La simultanéité a seulement une signification relative à un système d'inertie déterminé », l'ordre de succession des événements peut même être inversé selon les référentiels (un train allant de B vers A). « Des événements qui sont simultanés par rapport à la voie ferrée ne sont pas simultanés par rapport au train et inversement. Chaque corps de référence 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 » (Einstein, *relativité*, p.43)

« Par là, on arrive à une définition du temps en physique. Qu'on imagine, en des points d'un système de coordonnées, des horloges de même construction et réglées simultanément (au sens de transmission de signal lumineux). On entend alors par le « temps » d'un événement, l'indication de l'horloge immédiatement voisine de l'événement. A chaque événement est ainsi associée une valeur du temps qui est en principe observable » (*La relativité*, p.40)

«après que j'eus eu cette inspiration, cela ne m'a pris que cinq semaines pour mettre au point ce qu'on appelle maintenant la théorie de la relativité restreinte » (Einstein, 1922, in Paty, 85)

**Einstein 1913** : Galison« Imaginez deux miroirs horizontaux et parallèles constituant une « horloge » ou chaque tic-tac est défini par le trajet d'un éclair lumineux d'un miroir à l'autre. Supposez maintenant que cette « horloge lumineuse » se déplace horizontalement vers la droite. Pour l'observateur immobile, l'oscillation verticale du rayon lumineux présente un motif en dents de scie. Vu par l'observateur, le trajet de l'horloge en mouvement apparaît plus

long que l'horloge immobile. Or (second postulat de la RR), la vitesse  $c$  est la même pour tout référentiel : *même vitesse, distance supérieure, donc temps plus long*. L'observateur la mesure donc aussi à  $c$  le long des dents de scie ; le trajet est plus long et le tic-tac met plus de temps que pour une horloge immobile avec l'observateur. Superbe moyen de découverte de la formule temporelle de Lorentz :

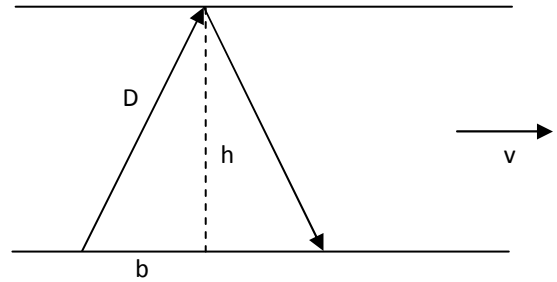
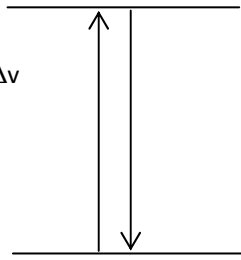
$$h = c \cdot \Delta t; D = c \cdot \Delta t' ; b = c \cdot \Delta v$$

$$D^2 = b^2 + h^2 \text{ soit}$$

$$(c \cdot \Delta t')^2 = (c \cdot \Delta v)^2 + (c \cdot \Delta t)^2$$

d'où :

$$\Delta t' / \Delta t = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$



Galison. Tout en découlera

« Si vous voulez connaître la longueur d'un autobus qui roule, il vous faut mesurer *en même temps* la position de l'avant et de l'arrière. Puisque la détermination de la longueur dépend des positions *simultanées* de l'avant et de l'arrière, la relativité de la simultanéité conduit à la relativité des longueurs (elle dépend de la situation de l'observateur). Mon système de coordonnées attribuera à une tige de un mètre se déplaçant par rapport à moi une longueur de moins d'un mètre. » (g.21)

Einstein

« L'incompatibilité apparente entre la loi de propagation de la lumière et le principe de relativité dérivait d'un raisonnement qui empruntait à la mécanique classique deux hypothèses que rien ne justifie :

1° L'intervalle de temps qui sépare deux événements est indépendant de l'état de mouvement du corps de référence ;

2° La distance spatiale de deux points d'un corps rigide est indépendante de l'état de mouvement du corps de référence.

Si on rejette ces deux hypothèses, le dilemme disparaît parce que le théorème de l'addition des vitesses n'est plus valable. Nous voyons apparaître la possibilité de concilier la loi de propagation de la lumière dans le vide avec le principe de relativité » (E. 47)

Einstein se pose alors la question : y a-t-il une transformation des coordonnées de position et de temps, liant deux référentiels en MRU, qui sauvegarderait la vitesse constante de la lumière et l'équivalence des lois physiques dans les deux systèmes ?

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \text{ et l'inverse pour passer de } S' \text{ à } S.$$

JHMC

« On postule donc implicitement, en mécanique classique que les interactions se propagent à une vitesse infinie. Or l'expérience montre qu'il n'existe pas d'interaction instantanée ; la répercussion de tout changement de l'état d'un corps sur un autre situé à une certaine distance n'a lieu qu'après un certain temps. Les interactions à distance se propagent donc avec une certaine vitesse finie. C'est le cas, par exemple des interactions électromagnétiques qui se propagent dans le vide à la vitesse  $c$ . » (JHMC, 29)

« si les interactions se propagent toutes à une certaine vitesse finie, il doit exister une vitesse de propagation supérieure à toutes les autres dans un référentiel donné. Mais, selon le principe de relativité, cette vitesse maximale doit être identique dans tous les référentiels d'inertie puisque les phénomènes naturels doivent être indépendants de tout référentiel. Il en résulte finalement que la vitesse maximale de propagation des interactions doit être une constante universelle. » (id)

• *La rétraction des longueurs*. C'est un effet réciproque, observationnel de cette transformation : soit une règle de longueur  $l_0 = x_2 - x_1$  en repos dans un premier système  $S$ . Comment la mesure-t-on dans  $S'$  ?

$$l_0' = x_2' - x_1' ; \text{ en remplaçant selon Lorentz, on trouve } l_0' = l_0 \times \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$



- *La dilatation des durées ou le ralentissement des horloges mobiles.* De la même façon, soit un événement dont la durée dans le système  $S'$  est donnée par  $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ ; quelle sera sa durée pour l'observateur lié au système  $S$ ?  $S'$  est animé d'un MRU de vitesse  $v$  par rapport à  $S$ .

On calcule que  $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

La longueur propre est supérieure à toute longueur impropre.

La durée propre est inférieure à toute durée impropre.

La loi de composition des vitesses :  $w = \frac{w' + v}{1 + \frac{vw'}{c^2}}$

Paty

- La diminution de la masse

nouveau concept d'énergie qui se conserve :

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = mc^2$$

Espace-temps de Minkowski-Poincaré

Soient deux événements  $S_1 (t_1, x_1, y_1, z_1)$  et  $S_2 (t_2, x_2, y_2, z_2)$  considérés dans un système  $S$ . On appelle intervalle entre ces deux événements la quantité  $ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$

En changeant de repère d'observation des deux événements  $ds'^2 = ds^2$

Einstein,

« C'est pourquoi, d'après la théorie de la relativité, le temps  $x_4$  s'introduit de la même façon que les coordonnées d'espace dans les lois de la nature » (cité p.49).

« Selon la théorie de la relativité restreinte, le continuum à quatre dimensions formé par l'union de l'espace et du temps retient le caractère absolu qui, selon la théorie précédente appartenait à la fois à l'espace et au temps séparément » (Einstein, *Essays in Science*, 1934).

Hermann Minkowski 1908 :

« Désormais, l'espace en lui-même, et le temps en lui-même sont condamnés à s'évanouir comme de pures ombres, et seule une sorte d'union des deux conservera une réalité indépendante » (*id.*).

Paty

« cette triade possède en commun les formules de transformation de coordonnées pour passer d'un système d'inertie à un autre – les équations de Lorentz-, les formules de variation de masse de l'électron avec la vitesse et des lois de transformation presque semblables des grandeurs électromagnétiques » (Paty, p.43-44)

Poincaré

« Si on peut, sans qu'aucun des phénomènes apparents soit modifié, imprimer à tout le système une translation commune, c'est que les équations d'un milieu électromagnétique ne sont pas altérées par certaines transformations, que nous appellerons *Transformations de Lorentz* ; deux systèmes, l'un immobile, l'autre en translation, deviennent ainsi l'image exacte l'un de l'autre » (Poincaré, 1905, in Paty, 47).

Lorentz

« Il apparaît, écrit Lorentz, que de cette façon les équations [...] sont les mêmes pour les deux systèmes, la différence étant seulement que pour le système sans translation, ces symboles indiquent le moment, les coordonnées et le temps vrais, tandis que leur signification est différente pour le système en mouvement » (Lorentz, *id.*, n.2)

Einstein

« On sait que l'électrodynamique de Maxwell, telle qu'elle est conçue aujourd'hui conduit, quand elle est appliquée à des corps en mouvement, à des asymétries qui ne semblent pas être inhérentes aux phénomènes » (in Paty, 54).

« Cette idée que deux cas essentiellement différents soient en jeu m'était insupportable. La différence entre les deux, j'en avais la conviction, ne pouvait être qu'une différence dans le choix du point de vue, et non une différence réelle » (Einstein 1920, in Paty, 79).