

LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ D'EINSTEIN

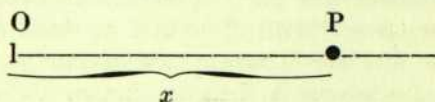
II. LA RELATIVITÉ DANS LA MÉCANIQUE CLASSIQUE

Considérons les eaux du Saint-Laurent coulant vers la mer et admettons que leur mouvement, pendant certaines heures de la journée, soit uniforme, c'est-à-dire que leur vitesse d'écoulement soit constante. Un observateur A, placé sur le bord du fleuve, en un endroit où les rives sont bien droites et parallèles, regarde un train de bois entraîné par le courant. Pour le mécanicien, l'eau, le radeau et même un observateur B, immobile sur ce dernier, ne forment qu'un unique système animé d'un mouvement de translation uniforme par rapport aux rives. L'observateur B ne se rend pas compte de son mouvement que s'il les aperçoit. Lorsque la brume descend et qu'elles lui sont cachées, il ne lui est plus possible de constater s'il est en mouvement ou non. Si la marée montante l'entraînait vers Trois-Rivières, il ne serait pas capable, par des expériences faites sur le radeau, de s'en rendre compte. Le mouvement rectiligne et uniforme d'un système de corps n'engendre aucune force à l'intérieur de ce système, et il ne peut être mis en évidence que par l'observation de corps extérieurs au système. Aussi bien, B peut-il prétendre que son radeau et l'eau du Saint-Laurent sont immobiles et que ce sont les rives qui glissent le long du fleuve. Physiquement parlant, il a raison.

Allons plus loin, et supposons un avion qui traverse l'espace d'un mouvement uniforme et rectiligne par rapport à la terre (observateur A). Pour B le mouvement, bien que de vitesse et de direction différentes, est encore rectiligne et uniforme.

Si du haut des airs, l'aviateur laisse tomber, sans vitesse initiale, une bombe dans le fleuve, il la voit tomber en ligne droite, tandis que les observateurs A et B remarquent tous deux qu'elle décrit une parabole. (1) La trajectoire de la pierre est-elle *en réalité* une droite ou une parabole? Tout dépend du système de référence que l'on choisit. Pour l'aviateur qui rapporte les déplacements de la bombe aux lignes de l'avion, le système de référence est l'aéroplane et la trajectoire est rectiligne. A ramène le mouvement à la terre, B au radeau : les trajectoires sont paraboliques. Chaque observateur ramène le mouvement d'un corps aux corps solides qui l'environnent. *La trajectoire d'un mobile est relative au système de référence choisi.*

Afin de généraliser la notion de système de référence, et de s'affranchir des corps solides, auxquels nous avons rapporté jusqu'ici le mouvement d'un mobile, les mathématiciens ont imaginé qu'à chaque observateur est attaché un système de trois plans, supposés rigides et rectangulaires deux à deux. Ainsi, dans une chambre, la position d'un objet pourrait être déterminée par ses distances au plancher et à deux parois latérales adjacentes. En d'autres termes, plus généraux, chaque point de l'espace est déterminé par ses distances qu'on désigne généralement par x , y et z , aux trois plans de coordonnées. Dans tout ce qui va suivre, pour plus de simplicité, nous ne considérerons que les points placés sur une droite. La position d'un point P quelconque de cette droite sera fixé, par sa distance x à un autre point choisi arbitrairement comme origine.



x est le résultat d'une mesure de longueur, c'est à-dire, nous est fourni par l'expérience. Si nous supposons, placé sur cette droite OP un corps solide ses deux autres dimensions seraient me-

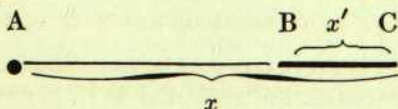
(1) Une parabole différente pour les deux observateurs, animés l'un par rapport à l'autre d'un mouvement de translation uniforme.

surées par y et z . Nous n'aurons pas à les faire intervenir dans nos raisonnements.

Les astronomes ramènent le mouvement de la terre à un système de référence dit de Galilée. Ce sont les étoiles fixes qui le déterminent, et les lois de la mécanique, de l'astronomie et de la physique ne sont vraies que pour ce système. L'éther est supposé immobile dans ce même système de référence, qui jouissait ainsi, avant Einstein, d'une importance toute spéciale. Un système d'axes de coordonnées solidaire de la terre peut être considéré, pendant un temps assez court, comme animé d'une translation uniforme par rapport aux étoiles fixes. Les lois de la physique sont-elles vraies pour ce système de référence ? Oui, pour celui-ci et pour une infinité d'autres, comme nous le montrerons plus tard.

Revenons sur les bords du Saint-Laurent et pour donner au problème qui nous occupe une forme mathématique plus simple, supposons l'observateur A placé sur un îlot minuscule au milieu du fleuve. Le radeau descend le courant et l'observateur B passe devant A exactement à midi. Nous choisissons midi comme origine du temps, c'est-à-dire, que nous comptons le temps à partir de l'instant où B et A sont en face l'un de l'autre. Pour étudier le mouvement du radeau, il ne suffit pas de connaître sa trajectoire (que nous supposons rectiligne) par rapport à certains axes de coordonnées, il faut encore noter en fonction du temps, les positions successives qu'il occupe.

Comptons les distances à partir de l'avant du radeau (point C). B est immobile sur le radeau, sa distance à l'avant est BC mesuré par x' . La distance de B. au point A augmente avec le temps. Si v est la vitesse du radeau par rapport à l'îlot sur lequel se trouve A, au bout d'un temps t après midi, la distance AB aura pour mesure le produit de la vitesse par le temps, soit vt .



Si x désigne la distance AC, on a immédiatement, d'après la figure : $x - x' = vt$. (1)

Nous avons supposé B immobile sur le radeau, autrement dit que la distance x' était constante. Rien ne nous empêche de nous débarrasser de cette restriction.

Nous pourrions, par exemple, imaginer que B se déplace vers l'avant d'un mouvement uniforme avec la vitesse v' . Sa vitesse par rapport à A ne serait plus celle du radeau, mais $v + v'$ et la distance x' serait variable. Si B se dirigeait vers l'arrière avec la même vitesse v , sa vitesse relativement à A serait $v - v'$. C'est le théorème classique de la composition des vitesses dont nous avons fait usage pour interpréter l'expérience de Fizeau.

Les raisonnements seraient les mêmes si A était mobile, s'il se promenait dans son île. Ce qui importe c'est la *vitesse relative* de A et de B. C'est elle qui entre dans la formule(1). C'est pourquoi celle-ci porte parfois le nom de *théorème de relativité classique*.

Ce théorème a été mis en défaut par diverses expériences de l'optique dans lesquelles il semble que la vitesse de la lumière jouit de propriétés particulières. Elle ne se compose pas avec d'autres vitesses comme le fait prévoir le théorème de relativité classique, et les expériences de Fizeau et de Michelson n'ont été expliquées qu'à l'aide d'hypothèses particulières. Nous aurions pu en citer d'autres, celles de l'astronome hollandais de Sitter, par exemple, qui par l'étude des étoiles doubles montre que la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de la source lumineuse.

Nous allons voir, maintenant, comment Einstein, par une critique serrée de la notion du temps, est arrivé à concilier les expériences de l'optique et le principe de relativité.

III. LA RELATIVITÉ EINSTEINIENNE DE L'ESPACE ET DU TEMPS

La formule(1) est la représentation mathématique d'un fait physique, la translation uniforme de B, par rapport à l'obser-

vateur A. Elle n'a un *sens physique* que si nous exprimons *physiquement* ce que nous entendons par le mot *temps*. C'est de cette critique de la notion du temps qu'est sortie la théorie de la relativité.

Remarquons que dans tous les raisonnements où intervient la notion de temps ou d'instant, nous la pouvons toujours remplacer par celle de simultanéité. Dire : l'*Empress of France* quitte Québec à 9 heures, revient à dire : le départ de *Empress* et la position de l'aiguille de ma montre sur le chiffre 9 du cadran, sont simultanés.(1)

On pourrait croire qu'en remplaçant la notion d'*instant* par celle de *simultanéité* toutes les difficultés soient écartées. Elles le sont, en effet, quand il s'agit d'événements qui se déroulent à l'endroit même où l'horloge et l'observateur sont placés. Mais si l'horloge est distante du lieu où se produit le phénomène les difficultés réapparaissent. Nous pourrions toutefois les surmonter, en établissant une correspondance entre l'observateur et l'horloge, au moyen de signaux lumineux.

Considérons en deux points A et B distants l'un de l'autre, deux observateurs munis chacun d'une horloge. Un observateur au point A détermine l'*instant* d'un événement se passant en A en notant la position de l'aiguille de son horloge au moment où le phénomène se produit. Au point B, fixe par rapport à A, le second observateur détermine de la même manière l'instant des événements qui se produisent en B. Mais il n'est pas possible, sans l'aide d'une convention préalable, de faire mesurer à B les événements qui se passent en A et inversement, à A les événements qui se passent en B. Nous n'avons défini jusqu'ici que le temps en A — par la simultanéité de l'indication de l'horloge A et de l'événement — et le temps en B (de la même manière), mais nous n'avons défini en aucune façon un temps commun pour les points A et B. Nous pouvons y arriver par la convention suivante : admettons que la lumière emploie le même temps pour aller de A jusqu'à B que

(1) EINSTEIN : *Annalen der Physik*, 1905. Wood; Optical Physics.

pour revenir de B vers A. Si un rayon de lumière partant de A au temps T^a (mesuré en A) arrive en B au temps T^b (mesuré en B) se réfléchit et revient à A au temps de T'^a , les deux horloges seront synchrones par définition, lorsque

$$T^b - T^a = T'^a - T^b \quad (2)$$

Supposons, pour fixer les idées, que A soit sur la terre, B sur le soleil. La lumière emploie environ 8 minutes pour parcourir la distance qui sépare les deux astres. Pour plus de simplicité supposons d'abord les montres d'accord et étudions la méthode au moyen de laquelle A et B peuvent contrôler ce fait. A envoie un signal lumineux à B au moment où sa montre marque midi : $T^a = 0$. Midi est pris arbitrairement comme origine du temps. B reçoit ce signal 8 minutes plus tard, comme l'indique la montre solaire : — $T^b = 8$. B envoie instantanément le signal 8 sur la terre. A le reçoit au temps $T'^a = 16$ d'après la convention que nous avons faite préalablement. Nous avons donc en appliquant la formule (2)

$$8 - 0 = 16 - 8$$

Si la montre solaire était en avance d'une minute sur la montre terrestre, B. signalerait 9 comme temps T^b et A recevrait ce signal au temps 16 comme précédemment. On aurait

$$9 - 0 \quad \text{différent de} \quad 16 - 9.$$

Cette définition de la simultanéité suppose :

- 1° Que la distance des observateurs A et B est constante.
- 2° que la lumière emploie le même temps pour aller de A à B que pour revenir de B à A.
- 3° que si les horloges sont d'accord à un instant donné, elles le sont encore à n'importe quel autre moment.

Nous croyons devoir insister sur ces points, car, dans une théorie, tout est dans le point de départ. Une fois les hypothèses admises, il suffit de tourner la manivelle mathématique pour en tirer toutes les conséquences et l'on ne trouve jamais, au bout des calculs que ce qu'on y a mis tout d'abord.

Montrons encore que cette définition n'est valable que pour les observateurs A et B, situés sur le système terre-soleil et n'a aucune valeur pour un observateur C placé sur une étoile fixe. Imaginons que le soleil et la terre se meuvent à travers l'espace, dans la direction de la droite qui les joint, la terre précédant le soleil. La distance des observateurs A et B reste constante et les horloges comme précédemment sont d'accord.

A envoie son signal à midi : $T^a = 0$ mais ce signal atteindra le soleil plus tôt que précédemment, par exemple 7 minutes après midi, car le soleil se déplace vers le point occupé par la terre au moment où le signal a été envoyé. B renvoie donc le signal 7 qui met plus de 8 minutes pour atteindre la terre puisque cette dernière s'éloigne. Supposons le temps écoulé égal à 9 minutes : $T'^a = 16$ comme précédemment, mais $7 - 0$ diffère de $16 - 9$. Les montres ne paraissent pas d'accord, l'heure solaire semble être en retard d'une minute sur l'heure terrestre. A va le faire savoir à B qui avancera sa montre d'une minute. On aura cette fois-ci : $8 - 0 = 16 - 8$.

Les montres paraissent d'accord pour les observateurs A et B. Elles ne le seront pas pour un observateur C, situé sur une étoile dans l'éther fixe. On obtiendrait le même résultat en supposant le système terre-soleil fixe et l'observateur C. en mouvement dans le sens opposé, car il n'existe aucun moyen de distinguer un mouvement de A et B par rapport à C, du mouvement de C par rapport au système A et B (1).

En résumé, nous ne pouvons attacher aucune signification absolue à la notion de simultanéité ou de coïncidence. Deux événements simultanés pour un observateur fixe ne le sont pas pour un observateur mobile. La simultanéité est relative au système de coordonnées, de référence, choisi.

(1) Au lieu de nous servir de signaux optiques pour établir une correspondance entre deux observateurs éloignés, nous pourrions tout aussi bien employer l'électricité. Les raisonnements seraient les mêmes, la vitesse de propagation de l'électricité étant égale à celle de la lumière, soit 300,000 km-sec. D'ailleurs la lumière est identifiée dans la théorie de Maxwell aux perturbations électromagnétiques et obéit aux mêmes lois que ces dernières.

Laissons C se morfondre sur son étoile fixe et ramenons A et B, observateurs dociles, l'un sur son île, l'autre sur son radeau, de telle sorte qu'ils soient animés l'un par rapport à l'autre d'un mouvement de translation uniforme. Dotons-les d'appareils de mesure identiques et faisons enregistrer par chacun l'histoire des événements qu'il observe, des expériences et des mesures qu'il fait ou qu'il voit faire à un collègue. Les deux histoires ainsi écrites ne sont pas indépendantes puisqu'elles ne sont que l'enregistrement des mêmes phénomènes vus par des observateurs dans différents états de mouvement. Si l'on connaît l'histoire écrite par A et le mouvement de B relativement à A, il doit être possible d'écrire *a priori* l'histoire enregistrée par B.

Si v désigne la vitesse relative de A et de B, la mécanique classique répond à la question par la formule (1) établie précédemment: $x' = x - vt$ à laquelle, pour être complet, il faudrait ajouter: $y' = y$, $z' = z$, c'est-à-dire que les deux autres dimensions sont indépendantes du mouvement et $t' = t$, le temps est le même pour A et pour B. Dans l'établissement de ces formules, nous nous sommes appuyés implicitement sur les deux principes suivants:

1. la durée d'un événement est indépendante du mouvement de l'observateur.
2. la distance de deux points d'un corps solide est également indépendante du mouvement de l'observateur.

Cette relation (1) qui exprime la relativité classique est en contradiction avec certaine expérience de l'optique, celle de Michelson par exemple. Einstein veut maintenir le principe de relativité et *sauver* l'expérience de Michelson. Le problème se pose à lui de la manière suivante: déterminer des formules de transformation qui relient x et t à x' et t' de manière que le principe de relativité soit vérifié et que la constance de la vitesse de la lumière soit sauvegardée.

Sa théorie va donc reposer sur la nouvelle conception du temps que nous venons d'exposer et sur les deux principes suivants:

1. *Le principe d'isotropie* qui est l'interprétation sans idées préconçues de l'expérience de Michelson et qui s'exprime ainsi : *la vitesse de la lumière est une constante indépendante du mouvement relatif de la source et de l'observateur.*

2. *Le principe de relativité restreinte* : *si B représente un système de coordonnées animé par rapport au système A d'une translation uniforme et si les lois de la physique sont vraies pour A, elles sont également vraies pour B.*

Ces deux principes se traduisent analytiquement par les formules suivantes :

$$x' = \frac{x - vt}{L} \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{L} \quad (3)$$

ou $L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ et c représente la vitesse de la lumière dans le vide, soit 300,000 km.—sec.

Einstein en donne une démonstration élémentaire dans sa brochure de vulgarisation (1). Elle est si claire qu'un collégien de seconde qui sait son algèbre peut aisément la contrôler.

Les formules (3) ne sont applicables que dans le cas d'un mouvement rectiligne et uniforme. C'est pourquoi nous parlons de relativité *restreinte* ; dans la relativité généralisée, Einstein s'est affranchi de cette restriction.

Si nous admettons que par rapport aux vitesses usuelles la vitesse de la lumière est infinie, les termes v/c^2 et v^2/c^2 , s'annulent, $L = 1$ et nous retombons sur les formules de la mécanique classique : $x' = x - vt$ et $t' = t$. Celles-ci peuvent donc être considérées comme une première approximation. Elles sont utilisables pour des vitesses petites par rapport à la vitesse de la lumière. La mécanique appliquée est complètement en dehors du domaine d'application de la relativité restreinte, les vitesses les plus grandes que nous puissions

(1) *La théorie de la relativité restreinte et généralisée*. A. EINSTEIN. Traduit par Mlle T. Rouvière, Gauthiers-Villars, édit.

réaliser ne dépassant pas 360 km. à l'heure, c'est à dire, 100 mètres à la seconde.

La vitesse de la lumière joue dans la relativité le rôle d'une vitesse limite : la vitesse d'un mobile, quel qu'il soit, ne peut jamais dépasser ni même atteindre la vitesse de la lumière. Si, en effet, nous faisons $v = c$, il vient $L=0$ x' et t' auraient des valeurs infinies n'ayant aucun sens physique. Pour v plus grand que c , L est imaginaire et la conclusion est la même, la vitesse de la lumière ne peut être dépassée.

La comparaison des formules (1) et (3) fait constater des divergences fondamentales entre la mécanique classique et celle d'Einstein, sur les points suivants :

1. *La simultanéité* est une notion absolue dans la cinématique newtonienne : $t' = t$. Deux événements simultanés pour A sont simultanés pour B (A et B étant deux observateurs animés l'un par rapport à l'autre d'une vitesse constante v). Dans la cinématique d'Einstein au contraire, la simultanéité est une notion relative : deux événements simultanés pour A peuvent ne pas être simultanés pour B. Nous en avons donné un exemple, Einstein en donne d'autres, très aisés à comprendre. La seconde des formules (2) fournit naturellement des résultats beaucoup plus précis que le langage courant. Elle exprime que le temps, c'est-à-dire l'heure qu'il est, dans un système, en mouvement, dépend de l'endroit où l'on se trouve dans ce système : t' dépend de x . C'est ce que les relativistes entendent par le *temps local*. Il existe toutefois un point du système mobile où le temps est le même que dans le système fixe. Une horloge placée en ce point marquerait, pour l'observateur A immobile, la même heure que l'horloge A. On trouve aisément la position de ce point en faisant $t' = t$ dans la formule du temps. Il vient : $x = t(1 - L) \frac{c^2}{v}$ et comme

L est approximativement égal à $1 - \frac{v^2}{2c^2}$, on a finalement

$$x = \frac{vt}{2}$$

Le point du système mobile où le temps est le même que dans le système fixe, se déplace par rapport au système fixe avec une vitesse moitié moindre que celle du système mobile. On peut se donner de ce fait la représentation matérielle suivante(1) : le radeau s'éloigne de A avec une vitesse v . Sur le radeau, B allume une mèche, tendue suivant la direction du mouvement, et qui brûle de l'avant vers l'arrière avec une vitesse $v/2$. Nous obtenons ainsi un point lumineux, qui pour l'observateur A se déplace dans le même sens que le radeau avec une vitesse deux fois moindre et qui pour l'observateur B s'éloigne, dans le même sens que l'îlot contenant A avec la même vitesse $v/2$ ($v/2$ étant par hypothèse la vitesse de combustion de la mèche). Une horloge qui suivrait ce point dans son mouvement, marquant, aussi bien pour A que pour B, la même heure que celle qu'ils emportent avec eux.

2. La relativité de la simultanéité entraîne celle de la durée. Un événement qui se déroule dans le système fixe, sur l'îlot, commence au temps t^1 et se termine au temps t^2 (mesurés par A). Sa durée pour A est $t^2 - t^1$. Pour B elle est :

$$t^2 - t^1 = \frac{t^2 - t^1}{L} \quad (4)$$

Comme le montrent les formules (3) L étant plus petit que l'unité, il s'en suit que la durée d'un phénomène qui se produit dans le système fixe A, est plus grande pour l'observateur B mobile par rapport à A que pour A. Ainsi une horloge placée sur l'île retarde pour l'observateur B et inversement A constate, que par rapport à la sienne, la montre de B retarde également. C'est cette symétrie dans les transformations causées par le mouvement qu'il est difficile de saisir au premier abord. On est tenté de croire que si, pour B la montre A retarde, pour A celle de B doit avancer. Comme il n'y a pas de mouvement absolu, B se considère comme immobile et

(1) Cette remarque m'a été suggérée par un de mes collègues, Monsieur A. Pouliot, que je tiens à remercier de l'intérêt qu'il a bien voulu porter à cette modeste étude de la relativité.

c'est A qui s'éloigne de lui avec la vitesse v , et ainsi chaque observateur voit la montre de l'autre en retard sur la sienne.

La formule (4) est indépendante de x , c'est-à-dire du point choisi dans le système fixe ou dans le système mobile. Le temps s'écoule de la même manière en n'importe quel point du système fixe ou du système mobile, ou, en d'autres termes, quelle que soit la position de B sur le radeau la durée d'un événement qu'il observe est la même. Pour A la durée du même événement serait différente.

On a écrit, à ce sujet, des absurdités qu'il n'est peut-être pas inutile de relever. En voici un échantillon : " Une femme encore belle, quittant un matin, sur les ailes d'un bon génie, sa fille jeune épousée, retournerait vieillie de dix-huit minutes, et retrouverait des petits enfants en cheveux blancs."

Il n'est point nécessaire d'être grand clerc en philosophie pour relever la contradiction entre l'exemple donné et la relativité restreinte. Celle-ci n'est applicable que dans le cas d'une vitesse constante en grandeur et direction. Si " la femme encore belle" va et revient à son point de départ, il faut nécessairement que sa vitesse ait varié en grandeur et en direction. Ergo, la théorie n'est pas applicable.

3. Dans la cinématique newtonienne, les *dimensions* d'un corps solide sont indépendantes du mouvement de ce corps. Pour Einstein, elles dépendent du mouvement relatif du corps et de l'observateur. Cela nous amène à distinguer entre la *forme géométrique* et la *forme cinématique* d'un corps.

Supposons qu'une tige rigide placée sur le radeau suivant la direction AC du mouvement ait une longueur l_0 mesurée par l'observateur B. Au moment où le radeau passe devant l'îlot deux observateurs A^1 et A^2 notent les points avec lesquels coïncident, au même instant, les extrémités de la règle. Une simple application de la première des formules (3) montre que la longueur de la règle pour les observateurs placés sur l'île n'est pas la même que pour l'observateur B. Si l est la longueur mesurée par A^1 et A^2 on a la relation :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (5)$$

La longueur cinématique l est plus petite que la longueur géométrique l_0 . (1)

Un corps en mouvement paraît raccourci dans le sens du mouvement pour des observateurs immobiles. Inversement, si la tige se trouvait sur l'île et que l'observateur B passe devant elle avec la vitesse v , il trouverait qu'elle est raccourcie dans le même rapport. Un corps, en repos dans le système, paraît toujours s'être contracté quand on mesure sa longueur dans un système en mouvement. Si la tige, au lieu d'être parallèle était perpendiculaire à la direction du mouvement, sa longueur géométrique et sa longueur cinématique seraient égales. Elle aurait par contre subi une contraction suivant la direction du mouvement: sa section aurait varié.

La formule (5) correspond exactement à l'hypothèse imaginée par Lorentz pour expliquer l'expérience de Michelson, mais grâce à Einstein cette explication ne repose plus sur une hypothèse particulière: la contraction des corps en mouvement par rapport à l'éther supposé absolument immobile. Elle fait maintenant partie d'une théorie générale dont nous tirerons encore bien d'autres conséquences.

Est-ce à dire que la contraction des corps en mouvement n'est pas réelle? Non point, les dimensions d'un corps n'ont pas de réalité objective, elles dépendent de l'état de mouvement de l'observateur. Pour un corps animé d'un mouvement rectiligne, seules les dimensions dans le sens du mouvement subissent une contraction, les autres restent inchangées. Cette contraction n'est d'ailleurs pas perceptible pour les vitesses ordinaires, mais seulement pour des vitesses du même ordre que celle de la lumière.

Il ne faut pas s'étonner que la théorie de la relativité explique l'expérience de Michelson. On pouvait le prévoir a

(1) Il est extrêmement difficile de l'expliquer sans recourir aux mathématiques. M. Charles Nordmann s'y est essayé et sa démonstration — obtenue non sans peine, dit-il — se retrouve chez d'autres commentateurs de la relativité. Elle est malheureusement contradictoire avec le principe d'isotropie.

priori, Einstein ayant adopté comme postulat, le principe d'isotropie, c'est-à-dire la constance de la vitesse de la lumière, résultat expérimental de la célèbre expérience.

4. Une des conséquences les plus intéressantes du principe de relativité est le théorème de la composition des vitesses. Dans le cas de vitesses constantes et de même sens, l'application des formules (3) n'amène pas à la relation classique $w = v + v'$ précédemment expliquée, mais :

$$w = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{c^2}} \quad (6)$$

La vitesse résultante n'est pas égale à la somme des vitesses; elle est plus petite que celle-ci.

Comme la différence n'est sensible que pour des vitesses considérables, donnons au radeau une vitesse de 100,000 km.-sec. et supposons que B se déplace par rapport au radeau avec la même vitesse fantastique : $v = v' = 100,000$ km.-sec.

L'observateur A qui mesure la vitesse de B ne trouve pas 200,000, mais seulement 180,000 km.-sec. B mesurant sa vitesse par rapport à A trouverait le même résultat.

On peut remarquer que dans la formule (6) comme dans les précédentes, la lumière joue le rôle d'une vitesse limite qui ne saurait être dépassée. Faisons $v' = c$, il vient $w = c$, quelle que soit la vitesse v . Un astre s'approche de la Terre avec la vitesse v , un rayon de lumière s'éloigne de l'astre avec la vitesse c , un observateur placé sur la terre ne trouve pas, comme vitesse de la lumière $v + c$, mais seulement c . C'est bien ce qu'avait trouvé de Sitter par l'étude des étoiles doubles. Aux faibles vitesses, auxquelles nous avons affaire dans la pratique, le terme $\frac{vv'}{c^2}$ de la formule (6) est si petit qu'on peut

le négliger devant l'unité. On retrouve la formule $w = v + v'$ de la mécanique classique.

La conséquence la plus importante du théorème de la composition des vitesses, c'est qu'il explique parfaitement

l'expérience de Fizeau. Il s'agit de mesurer la vitesse de la lumière dans un courant d'eau. Celle-ci coule relativement à l'observateur avec la vitesse v , la lumière se propage dans l'eau avec la vitesse v' égale à 225,000 km.-sec. En appliquant la formule (6) on retrouve le résultat expérimentale avec une précision admirable, et sans avoir recours à une hypothèse particulière, telle que la condensation de l'éther dans les corps réfrigérants qu'avait imaginée Fresnel. Aussi Einstein est-il en droit de considérer l'expérience de Fizeau comme *cruciale* en faveur de la théorie de la relativité restreinte.

Il n'est pas sans intérêt de rappeler ici, qu'une autre expérience de Fizeau, la mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau immobile, renversa la théorie de l'émission au profit de celle des ondulations. Les physiciens d'alors n'étaient pas moins attachés aux idées de Newton que ceux d'aujourd'hui, et ils n'avaient pas moins de répugnance à rejeter l'idée des particules lumineuses qu'on en a maintenant à renoncer aux notions classiques d'espace et de temps. Nos successeurs comprendront nos hésitations, mais ils ne pourront s'empêcher de sourire, en passant devant l'armoire aux vieilles lunes, où ils auront serré, à côté du phlogistique et du mouvement perpétuel, le Temps et l'Espace Absolus.

Alphonse CHRISTEN
