

Les bases logiques de la théorie de relativité généralisée

Autor(en): **Schidlof, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences physiques et naturelles**

Band (Jahr): **3 (1921)**

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-741097>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

LES BASES LOGIQUES

DE LA

THÉORIE DE RELATIVITÉ GÉNÉRALISÉE

PAR

A. SCHIDLOF

Les pages qui suivent ont pour but de servir d'introduction à une étude de la théorie de relativité généralisée. Modifiant profondément les bases sur lesquelles repose l'édifice entier de la physique cette théorie est indiscutablement un des plus grands événements de l'histoire de la science. Elle a rompu des liens séculaires que la raison a cru devoir s'imposer, et elle a procuré à la pensée scientifique une liberté qu'elle n'a jamais connue auparavant. Cette œuvre de libération était-elle indispensable? N'est-elle pas trop révolutionnaire? Pour répondre à ces questions il est nécessaire de soumettre les nouvelles idées à un examen approfondi.

Sans aborder les problèmes philosophiques qu'on peut soulever à cet égard, nous nous proposons d'étudier ici la théorie dépouillée, autant que possible, de son enveloppe mathématique pour mettre en évidence la nécessité logique avec laquelle s'enchaînent ses idées.

I. — LA THÉORIE DE RELATIVITÉ RESTREINTE.

La théorie de relativité généralisée est l'aboutissement logique du raisonnement sur lequel repose la théorie restreinte. Telle quelle la théorie restreinte est une construction inachevée. Il importe d'en rappeler d'abord brièvement les notions fonda-

mentales et quelques-uns des résultats. On verra ensuite pourquoi on ne peut se contenter de cette théorie qui impose à l'esprit le sacrifice de beaucoup de ses habitudes sans atteindre complètement le but visé.

Pour concilier les résultats expérimentaux de l'électrodynamique avec les équations de la théorie de Maxwell, H. A. Lorentz (1) a admis certaines hypothèses relatives à l'influence du mouvement sur les étalons de longueur et sur la marche des montres, et il a abandonné la définition usuelle de la simultanéité. Reposant sur une base empirique ces hypothèses s'expriment par les formules d'une transformation appelée la transformation de Lorentz. D'après la théorie électromagnétique de Maxwell il y aurait un désaccord entre les constatations faites par un observateur qui rapporte ses mesures à un système de référence matériel S et celles d'un second observateur qui effectue les mêmes mesures avec des instruments qui sont en repos dans un autre système S' animé d'un mouvement uniforme par rapport au premier. Ce désaccord disparaît si, à la place des formules de transformation usuelles de la mécanique, on se sert de la transformation de Lorentz pour passer d'un système à l'autre. En dépit de leur symétrie parfaite et de leur caractère mathématique simple, les équations de transformation de Lorentz présentent une signification difficilement saisissable à première vue et conduisent à des conséquences étranges. Rappelons-en quelques-unes des plus surprenantes : Une montre animée d'un mouvement uniforme marche d'autant plus lentement que la vitesse du mouvement s'approche davantage de celle de la lumière. Si l'on communiquait à la montre une vitesse égale à celle de la lumière, elle s'arrêterait ; si sa vitesse était, par exemple, à celle de la lumière dans le rapport 0,866, la montre marcherait deux fois plus lentement qu'à l'état de repos. Elle ne marquerait donc que la moitié du temps écoulé dans le système en repos. Tout effet physico-chimique étant supposé ralenti par le mouvement dans la même proportion il en résulte la conséquence curieuse qu'il suffit de voyager avec une énorme vitesse pour vieillir lentement.

L'influence du mouvement sur l'unité de longueur est analogue à celle exercée sur les montres. Suivant la direction du

mouvement, l'unité de longueur est agrandie dans la même proportion que la période d'une montre. Vues à partir du système en mouvement, toutes les distances paraissent raccourcies dans la direction du mouvement sur un corps qui est en repos. On appelle cet effet la « contraction de Lorentz ». Son existence semble démontrée par le résultat négatif de la célèbre expérience de Michelson et Morley (2).

Supposons qu'on effectue des mesures au soleil avec des étalons de longueur et de temps immobiles par rapport à la terre ; l'unité de longueur est alors allongée dans la direction du mouvement, et par conséquent la sphère solaire se montre aplatie suivant cette direction. Cet effet est à peu près inappréciable parce qu'il est de 5 milliardièmes seulement. La période d'une montre immobile par rapport au soleil est augmentée dans la même proportion. Notons qu'on arrive exactement au même résultat si l'on fait des mesures sur la terre avec des étalons immobiles par rapport au soleil, car la vitesse relative des deux systèmes de référence est la même, en valeur absolue, dans les deux cas.

Quant à la nouvelle définition de la simultanéité, elle fait dépendre cette notion de la vitesse relative de l'observateur. Suivant la grandeur et l'orientation de cette vitesse un même événement peut appartenir soit au passé, soit à l'avenir. L'ordre de succession chronologique n'a donc aucune signification absolue. Il en résulte qu'en principe l'effet ne doit pas *nécessairement* succéder à la cause. En fait on peut exclure de la théorie restreinte la possibilité d'un effet antérieur à sa cause si l'on admet qu'aucun signal ne peut être transmis avec une vitesse dépassant celle de la lumière dans le vide.

En insistant sur le caractère essentiellement *métrique* de ces hypothèses M. Albert Einstein (3) a montré qu'aussi étranges qu'elles puissent paraître elles ne peuvent conduire à aucune contradiction. Elles se rattachent à la relativité de l'espace et du temps. Puisqu'il n'existe pas de repères absolus, il faut avoir recours à un principe expérimental, pour établir l'accord entre les mesures faites par des observateurs animés de vitesses différentes. Or, toutes ces hypothèses découlent d'un principe unique : La vitesse de propagation attribuée par un observateur à un

signal lumineux présente la même valeur quel que soit le mouvement de l'observateur, par rapport à la source qui émet le signal. Einstein demande que ce principe forme désormais la base *expérimentale* de la cinématique.

Inspiré par les idées d'Einstein, un mathématicien de génie, H. Minkowski (4), a montré en 1908, peu de temps avant sa mort prématurée, que l'hypothèse de la constance de la vitesse de la lumière est, mathématiquement, une des plus simples qui puisse être formulée si l'on renonce à la métrique absolue. Elle signifie, en effet, que la cinématique n'est autre chose que la géométrie analytique d'un continu euclidien à quatre dimensions dans lequel une des coordonnées, celle qui représente le temps, joue le rôle d'une variable imaginaire. On dit qu'une des dimensions est négative, les trois autres étant positives.

La conception d'un continu à quatre dimensions conduit nécessairement à une généralisation des notions de la géométrie euclidienne à trois dimensions, de même que la géométrie de l'espace conduit au delà des limites de la géométrie plane. A côté des surfaces planes nous trouvons dans l'espace des surfaces courbes, cylindriques, coniques, sphériques ayant d'autres propriétés métriques que le plan. On peut donc concevoir, à côté de la géométrie plane, d'autres géométries bidimensionnelles, par exemple celle des surfaces sphériques. Pareillement, dans l'hyperespace à quatre dimensions nous trouvons des continus à trois dimensions dont les propriétés métriques diffèrent de celles de l'espace plan. On appellera ces continus, par analogie avec le cas bidimensionnel, des espaces courbes coniques, cylindriques, sphériques, etc.

Il est bien entendu que ce ne sont là que des expressions commodes. La métrique du continu de Minkowsky est euclidienne, cela veut dire que le carré de la longueur d'un vecteur est égal à la somme des carrés de ses quatre projections orthogonales. L'un de ces carrés est toujours négatif. Il en résulte qu'il existe dans ce continu des vecteurs de longueur nulle dont les projections sur les quatre axes d'un système cartésien sont différentes de zéro.

Cela arrive aussi dans la géométrie plane si l'une des coordonnées est une grandeur imaginaire. Dans ce cas, si les projec-

tions d'un vecteur sur les deux axes rectangulaires sont égales, la longueur du vecteur est nulle. Par conséquent, tous les vecteurs parallèles à l'une des deux droites bissectrices de la croix des axes ont une longueur nulle. Ces quelques considérations géométriques faciliteront l'étude des propriétés du continu de Minkowski (5).

Traçons dans un plan chrono-spatial deux axes perpendiculaires et attribuons à l'ordonnée (imaginaire) la signification du temps t . L'axe des abscisses est alors l'intersection du plan de

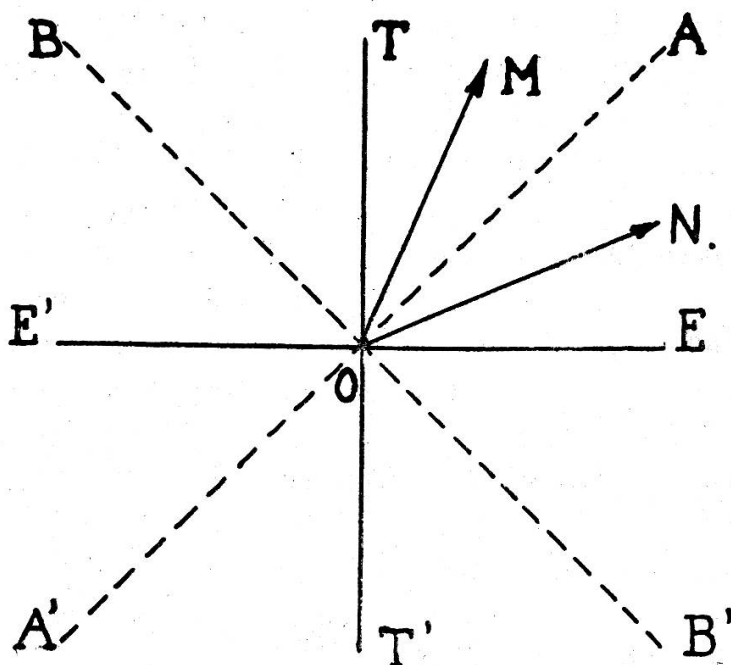


Fig. 1.

la figure avec un espace plan à trois dimensions, lieu géométrique des points pour lesquels le temps t présente la valeur zéro. (Voir la figure 1.) En choisissant les unités de longueur et de temps de telle façon que la vitesse de la lumière prenne la valeur 1 nous désignons par x, y, z les coordonnées d'un point de l'espace plan $t = 0$. Le carré de la « distance » $OP = d$, dans le continu de Minkowski, O étant l'origine et P un point dont les coordonnées sont x, y, z et t , est :

$$d^2 = x^2 + y^2 + z^2 - t^2 .$$

Cette définition est *invariante* vis-à-vis de la transformation de Lorentz. En effectuant cette transformation on attribue au point P d'autres coordonnées x', y', z', t' mais la valeur de d^2 reste inchangée.

Les droites AA' et BB' bissectrices des axes OT et OE sont les « trajectoires » rectilignes des signaux lumineux qui arrivent en O ou qui partent de O à l'instant $t = 0$. L'ensemble de ces trajectoires forme un continu à trois dimensions défini par l'équation (invariante)

$$x^2 + y^2 + z^2 - t^2 = 0 .$$

C'est un espace conique. Les droites AA' et BB' ne sont autre chose que l'intersection de cet espace conique avec le plan de la figure. Le cône postérieur A'OB' dont les points ont des ordonnées négatives ($t < 0$) représente l'impression que produirait l'univers entier au moment $t = 0$ sur un œil ponctuel placé en O. Le cône antérieur AOB, par contre, pour les points duquel le temps est positif, comprend l'ensemble des points de l'univers qui seront atteints par un signal électromagnétique instantané émis au moment $t = 0$ par un excitateur ponctuel disposé en O. Des signaux qui se propagent avec une plus petite vitesse v ($v < 1$) atteindront d'autres points situés plus près de l'axe OT. Aucune action, par contre, produite en O au moment $t = 0$ ne pourrait atteindre des points situés dans l'avenir ($t > 0$) en dehors des sphères que découpe l'espace conique AOB dans les espaces plans parallèles à l'espace EE' ($t = 0$).

La géométrie analytique du continu de Minkowski diffère de la géométrie usuelle surtout en raison du signe — attribué à la quatrième dimension. Il y existe, comme nous l'avons dit, des vecteurs de longueur nulle dont la projection sur une droite quelconque est en général différente de zéro. L'espace conique mentionné est le lieu géométrique des vecteurs de longueur nulle dont la direction passe par O. La géométrie de ce continu à trois dimensions présente une autre particularité curieuse : chaque vecteur de cet espace est perpendiculaire à lui même.

Du reste, dans tout plan chrono-spatial tel que le plan de la figure 1, la notion de perpendicularité doit être prise dans un sens non-euclidien. Deux vecteurs tels que OM et ON formant

des angles égaux avec la trace de l'espace conique OA sont dits *perpendiculaires* l'un à l'autre. On peut donc aussi choisir OM à la place de OT comme axe du temps. L'intersection purement spatiale du plan de la figure est alors indiquée par le vecteur ON perpendiculaire à OM. Cette substitution des axes OM et ON à la place de OT et OE est l'interprétation géométrique de la transformation de Lorentz. On y reconnaît en même temps la portée de la nouvelle notion de simultanéité donnée par Einstein.

Tous les espaces plans (euclidiens) à trois dimensions extérieurs à l'espace conique AA', BB' peuvent être considérés comme comprenant des points simultanés avec le point O ($t = 0$). A chacun de ces espaces correspond un système de référence spatial équivalent au système OE et animé par rapport à ce système d'une certaine vitesse. La limite est formée par un des systèmes tangents au cône OA animé d'une vitesse 1, égale à celle de la lumière.

Chaque vecteur situé à l'intérieur de l'espace conique AOB et dirigé vers l'avenir peut être pris comme axe du temps d'un système de référence chrono-spatial. Une construction très simple permet de trouver les unités de l'espace et du temps pour chacun des systèmes de référence équivalents. La vitesse du système spatial ON, auquel correspond l'axe du temps OM, vis à vis du système primitif OE est exprimée par la tangente trigonométrique de l'angle TOM. Présentée sous cette forme la théorie d'Einstein prend une signification intuitive. Il est toutefois nécessaire d'abandonner la métrique euclidienne lorsqu'on raisonne sur les figures géométriques tracées dans un plan chrono-spatial¹.

Au point de vue philosophique et physique la conception de Minkowski n'ajoute évidemment rien aux idées d'Einstein, mais l'avantage qu'elle permet de faire appel à l'intuition n'est nullement à dédaigner. La cinématique d'Einstein est certainement moins simple que l'ancienne cinématique mais elle a l'avantage

¹ On peut aussi conserver formellement la géométrie euclidienne et baser le raisonnement sur la théorie des grandeurs imaginaires, mais cette méthode algébrique est moins intuitive.

de reposer sur une base expérimentale. Est-elle en contradiction ou non avec la conception kantienne de l'espace et du temps ? Certaines notions considérées par Kant comme des idées a priori ont dû être abandonnées, et cela même avant l'apparition de la théorie d'Einstein ; mais cela ne semble pas justifier l'affirmation que cette théorie impose la revision des principes philosophiques qui doivent former la base de tout raisonnement théorique, et qui plongent leurs racines dans les abîmes insondables entourant de toutes parts le domaine de nos connaissances.

Logiquement cette théorie signifie un progrès manifeste vis à vis de la cinématique de Newton basée sur la notion métaphysique du temps absolu, mais elle a emporté les suffrages parce qu'elle a ouvert à la science des horizons nouveaux.

II. — CONSÉQUENCES MÉCANIQUES DE LA THÉORIE D'EINSTEIN.

La base expérimentale de la transformation de Lorentz est l'optique et l'électrodynamique des corps en mouvement. Si le but d'une théorie physique était de « sauver les phénomènes » pour une partie restreinte de la science on pourrait se passer de l'outillage mathématique de Minkowski et adopter, par exemple, une théorie d'émission. Du point de vue d'Einstein il faut nier l'existence matérielle de l'éther, et on enlève ainsi aux vecteurs qui interviennent dans les équations de Maxwell leur signification immédiate.

La vérité vue par Einstein était de tout autre nature. De la validité des équations de transformation de Lorentz pour l'électrodynamique des corps qui se meuvent avec une grande vitesse, il concluait à leur validité pour la mécanique. Il pouvait ainsi faire rentrer dans le cadre de cette discipline les mouvements extrêmement rapides.

Avant Einstein déjà, on avait prouvé que des modèles purement électromagnétiques permettent l'interprétation de l'inertie de la matière. Une charge électrique en mouvement est entourée du champ magnétique créé par le courant de convection dont l'intensité est proportionnelle à la quantité d'électricité de la

charge et à sa vitesse. D'après les lois de l'électromagnétisme l'énergie du champ magnétique croît proportionnellement au carré de la vitesse de la charge, donc proportionnellement à sa force vive, et il faut, d'après le principe de la conservation de l'énergie, dépenser un certain travail pour accélérer le mouvement de la charge. On démontre facilement que la force nécessaire pour accomplir ce travail est proportionnelle à l'accélération produite. Le coefficient de proportionnalité qui dépend de la vitesse de la charge n'est autre chose que la masse électromagnétique.

Ce qui distingue la masse mécanique usuelle de la masse électromagnétique c'est que celle-ci dépend de la vitesse. Cette différence devient inappréciable pour les petites vitesses. On est donc conduit à supposer que la mécanique électromagnétique est simplement celle qui s'applique aux mouvements rapides des corps et on peut chercher la réponse à la question : Comment varie la masse avec la vitesse ?

D'abord il faut noter que la force produit une accélération différente suivant qu'elle agit parallèlement ou perpendiculairement à la direction du mouvement. Il existe donc une masse « transversale » différente de la masse « longitudinale ». Une troisième expression, qui pour le cas des petites vitesses se réduit également à celle de la masse, intervient dans la formule de la force vive. Sur ce point toutes les théories sont d'accord ; elles diffèrent quant aux expressions algébriques des différentes masses. Celle de Minkowski-Einstein permet de trouver les lois de la dynamique des grandes vitesses d'une manière particulièrement simple (6).

On admet que les formules de la mécanique usuelle sont rigoureusement vraies pour un système de référence par rapport auquel le point matériel considéré est animé d'une vitesse infiniment petite. La transformation de Lorentz permet d'obtenir les lois applicables à tout autre système de référence par rapport auquel le point est animé d'une vitesse quelconque, inférieure toutefois à la vitesse de la lumière. Géométriquement la transformation s'effectue en décomposant les vecteurs qui dans le continu de Minkowski représentent la force, la vitesse, l'accélération en une composante spatiale et en une composante

« perpendiculaire » à l'espace plan particulier dont il s'agit. Rappelons que le terme « perpendiculaire » ne doit pas être pris ici dans le sens usuel de la géométrie euclidienne mais dans le sens non-euclidien expliqué précédemment.

Si l'on exprime les résultats de cette décomposition par des formules rapportées à quatre axes cartésiens on déduit de tout théorème de la mécanique newtonienne deux, dont l'un concerne la composante spatiale du vecteur considéré, tandis que l'autre exprime une relation à laquelle doit satisfaire la composante que possède le même vecteur suivant la direction de l'axe du temps. De cette manière on obtient à la fois le principe de la conservation de la quantité de mouvement comme composante spatiale, et le principe de la conservation de l'énergie comme composante temporelle d'un même théorème de conservation.

En désignant par m la masse du point matériel, considéré dans un système par rapport auquel il est en repos, son énergie cinétique par rapport à un autre système qui se meut avec la vitesse v est

$$\frac{m}{\sqrt{1 - v^2}}$$

Einstein a déduit de cette formule la conséquence que la masse inerte n'est autre chose que l'énergie même de la matière, considérée dans un système spatial par rapport auquel elle est en repos.

Si l'on attribue à la vitesse de la lumière la valeur c , au lieu de 1, l'unité d'énergie est de c^2 fois plus petite que celle dont on se sert habituellement dans la théorie de Minkowski. La quantité d'énergie dont la masse inerte est M s'exprime alors par Mc^2 . En utilisant les unités *c. g. s.* on trouve pour l'énergie contenue dans un gramme de matière le chiffre de $9,10^{20}$ ergs¹.

Le contrôle expérimental direct de cette prévision d'Einstein n'a pu être fait jusqu'à présent. On a par contre vérifié que l'iner-

¹ Exprimée en unités industrielles cette énergie est de $9,10^{13}$ joules ou 2,86 millions de watts-années. Puisque un cheval-vapeur équivaut à 736 watts, l'énergie de 1 gr de matière suffirait, si elle pouvait être récupérée sans pertes, à entretenir pendant une année le fonctionnement d'une très grande turbine de 3880 HP.

tie des corpuscules cathodiques varie avec la vitesse conformément à la théorie d'Einstein et que cette variation d'inertie correspond précisément à la variation d'énergie cinétique. C'est ce qu'ont vérifié de façon particulièrement concluante les expériences de MM. C.-E. Guye et Ch. Lavanchy (7).

En second lieu, fait particulièrement remarquable, qui montre la grande valeur euristique de la théorie, M. Sommerfeld (8) a pu, en 1916, compléter la théorie de Bohr relative à la structure des atomes par des calculs basés sur la mécanique de relativité. Ici des vérifications expérimentales extrêmement précises sont possibles grâce au haut perfectionnement des méthodes spectroscopiques et grâce à leur extension aux spectres des rayons X. Or, les prévisions ont été confirmées quantitativement en ce qui concerne la structure fine des raies spectrales de la série de Balmer et celle des raies de la série K des éléments à poids atomique élevé.

La proportionnalité entre la masse et l'énergie a suggéré à M. Langevin (9) une interprétation remarquable des petits écarts entre les masses atomiques des éléments et les multiples entiers de celle de l'hydrogène. La théorie d'Einstein est ainsi une partie intégrante des doctrines actuelles sur la constitution de la matière.

La dynamique générale des fluides repose sur la théorie des corps élastiques. Comme l'on sait, les forces exercées sur la surface d'un parallélépipède infiniment petit constituent un « tenseur » qui, géométriquement, aurait neuf composants¹ mais, les moments des forces qui tendent à faire tourner le parallélépipède devant être nuls, les composantes tangentielles du tenseur seront égales deux à deux, ce qu'on exprime en nommant le tenseur *symétrique*. Le tenseur symétrique n'a que six composantes distinctes dont les dérivées interviennent dans les conditions d'équilibre du parallélépipède élémentaire.

D'après les règles de l'analyse vectorielle, en additionnant les dérivées partielles d'un tenseur symétrique on obtient trois

¹ Sur chacune des trois faces parallèles aux trois plans coordonnés agissent deux composantes tangentielles et une composante perpendiculaire, donc neuf composantes en tout.

sommes, chacune de trois termes, qui sont les composantes d'un vecteur appelé la *divergence* du tenseur. Un élément de volume est en équilibre si cette divergence composée avec le vecteur qui représente la densité de la force appliquée à la matière de l'élément de volume donne une résultante nulle. Si le fluide est en mouvement la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement s'ajoute vectoriellement à cette résultante de façon à fournir encore une somme (vectorielle) nulle.

Pour ce qui concerne les mouvements lents la théorie de relativité se confond avec l'hydrodynamique classique. On passe au cas des mouvements rapides au moyen d'un raisonnement analogue à celui qui fournit les principes de la dynamique du point matériel.

Il y a conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement si la résultante de certains vecteurs appliqués aux éléments d'une portion donnée du continu de Minkowski est nulle. Du point de vue de l'analyse vectorielle, il revient au même de dire que les quatre composantes de la divergence d'un certain tenseur symétrique sont nulles. L'introduction d'un tenseur à la place des vecteurs est indiquée, car si les composantes de la divergence d'un tenseur sont nulles, pour un domaine donné, on peut former, au moyen des composantes de ce tenseur, des vecteurs dont le flux traversant les limites de la portion considérée est nul. On obtient ainsi dans la géométrie à trois dimensions des intégrales de surface à la place des intégrales de volume. Une simplification analogue résulte de l'introduction d'un tenseur symétrique, à la place des vecteurs, dans le continu de Minkowski. Dans un continu à quatre dimensions un tenseur symétrique possède dix composantes, dont six de nature purement spatiale, plus une composante purement temporelle et trois composantes d'un caractère mixte. Ce tenseur dont la divergence doit avoir des composantes nulles pour toute portion limitée ou illimitée du continu s'appelle le tenseur de l'énergie et de la quantité de mouvement, ou plus simplement le « tenseur d'énergie ».

Dans tout chapitre de la physique un pareil tenseur doit intervenir. Pour ce qui concerne en particulier les phénomènes électromagnétiques dans le vide, les six composantes spatiales du

tenseur d'énergie s'identifient avec les tensions de Maxwell qui constituent, comme l'on sait, un tenseur symétrique; la composante purement temporelle est la densité de l'énergie du champ électromagnétique, et les trois composantes de caractère mixte ne sont autre chose que les composantes de la quantité de mouvement du champ électromagnétique représentées par le vecteur de Poynting.

Il y a donc dans le champ électromagnétique de l'énergie et de la quantité de mouvement. Tout en niant l'existence de l'éther Einstein attribue au champ électromagnétique une réalité physique, puisque l'énergie, la quantité de mouvement sont inséparables de la masse inerte. Quant à l'ancien dilemme: action à distance ou action du milieu, la théorie de relativité prend une position intermédiaire. Les effets électromagnétiques, les tensions se propagent dans l'espace vide avec une vitesse finie. C'est là manifestement une solution très élégante d'un problème qui a longtemps embarrassé les physiciens.

Il y a cependant quelques ombres dans ce tableau plein de lumière. D'abord la théorie ne donne pas satisfaction complète au point de vue mécanique, car elle ne dit rien sur l'action de la gravitation. Or la revision de ce problème, qui depuis Galilée et Newton se trouve à la base de la mécanique, s'impose puisque ici aussi il faut savoir comment les choses se passent dans les cas des mouvements rapides.

D'autre part, ce qui est bien plus grave, si l'on examine de près les bases logiques de la théorie, on se heurte à des contradictions. Le fondateur de la théorie, Albert Einstein, n'a jamais perdu de vue ces défauts, et il a consacré un effort de 10 ans à la tâche d'y remédier. De cet effort est née la théorie généralisée.

III. — NÉCESSITÉ D'UNE GÉNÉRALISATION DE LA THÉORIE DE RELATIVITÉ.

Dans la mécanique de Newton, sous sa forme primitive, l'espace absolu et le temps absolu jouent un rôle essentiel. Les a-t-on complètement éliminés de la théorie de relativité restreinte?

L'espace absolu intervient d'abord dans le principe fondamental de la mécanique, le principe de l'inertie : En l'absence de toute force le mouvement d'un point matériel est rectiligne et uniforme. D'après la conception newtonienne, il est rectiligne et uniforme par rapport à l'espace absolu qui « en vertu de sa nature et sans relation avec un objet extérieur reste toujours uniforme et immobile ». D'après la théorie de relativité le mouvement doit être rectiligne et uniforme par rapport à un système de référence dont le mouvement est supposé rectiligne et uniforme. Rapportées à un pareil système les lois dynamiques prennent une forme particulièrement simple en vertu du principe de relativité de Galilée.

On appellera donc un système de référence de ce genre, qui joue un rôle exceptionnel dans la théorie de relativité restreinte, un « système galiléen ». Dans le continu de Minkowski tous les systèmes galiléens munis de leurs axes de temps respectifs sont équivalents. C'est là le sens mécanique de la transformation de Lorentz.

Mais comment s'affranchir de la relation avec l'espace absolu et avec le temps absolu qui intervient dans la définition d'un système galiléen ?

D'après C. Neumann et L. Lange (10) on peut se passer de repères absolus en les remplaçant par un critérium expérimental permettant de décider si un système donné est galiléen ou non. Lançons à partir d'un point du système trois points matériels suivant trois directions différentes. Si le mouvement de chacun des trois points est rectiligne et uniforme le système de référence est galiléen. Dans un pareil système chaque point matériel libre (n'étant soumis à l'action d'aucune force) effectuera un mouvement rectiligne et uniforme.

Cette définition pourrait nous satisfaire s'il était possible de vérifier que le mouvement d'un point donné est rectiligne et uniforme. Du point de vue d'une théorie qui admet l'existence d'un étalon invariable de longueur et d'une montre qui marche uniformément, quelle que soit sa vitesse, cette vérification est possible, mais il n'en est plus de même si l'on adopte les conceptions métriques de la théorie de relativité restreinte. Ici la contradiction devient irrémédiable.

Il y aurait peut-être une issue, si l'on pouvait caractériser le mouvement rectiligne et uniforme par une propriété mécanique exceptionnelle, particulière aux systèmes galiléens, en dehors de celle qui intervient dans leur définition. Or, la seule propriété mécanique remarquable d'un système matériel animé d'une translation uniforme est l'invariabilité de son énergie, mais cette propriété est aussi l'apanage d'un corps animé d'une rotation uniforme. Cependant, dans le second cas, les lois dynamiques n'ont nullement la même simplicité que dans le premier.

L'exemple du corps tournant est la difficulté la plus grave qui a fait échouer jusqu'à présent les raisonnements de tous les relativistes. Aux points matériels d'un pareil corps s'appliquent les forces centrifuges. Une masse fluide en rotation uniforme s'applatirait donc et prendrait la forme d'un ellipsoïde de révolution, même si elle était le seul corps de l'univers. Il n'y a rien à dire contre cette supposition si l'on accepte le point de vue de Newton. En discutant l'expérience de la rotation d'un récipient rempli d'eau Newton insiste spécialement sur l'idée que la force centrifuge intervient bien dans le mouvement de rotation absolu du fluide, mais non pas dans sa rotation relative par rapport aux parois du récipient.

E. Mach (11) était le seul des physiciens du 19^e siècle qui eût reconnu clairement que l'espace absolu est une base *essentielle* de la mécanique de Newton. D'un point de vue vraiment relativiste, le principe de Galilée est insuffisant ; *n'importe quel système de référence devrait être équivalent à un système galiléen*, si l'on veut éviter que l'espace absolu intervienne sous forme d'une cause physique.

Cette manière de voir n'est pas partagée par H. Poincaré (12), mais ce qu'il dit sur le problème de la relativité de l'espace n'est pas très satisfaisant. En traitant, sous une forme un peu différente, le même problème d'un corps isolé animé d'un mouvement de rotation, il établit que les savants, en étudiant sur ce corps les lois de la mécanique, découvriraient finalement que le corps tourne. Il se hâte d'ajouter que, l'espace n'ayant pas d'existence objective, cela ne signifie pas que le corps tourne vraiment, mais seulement qu'il est plus commode de supposer que le corps tourne. Cette distinction est bien subtile.

Logiquement, tout effet physique doit être attribué à une cause physique. Laisser subsister des effets dont on s'*interdit* de rechercher la cause est un aveu d'impuissance. Le point de vue de Mach s'impose donc avec une grande force de conviction, mais Mach non plus n'a indiqué aucun moyen pour sortir de cette impasse.

Pour tout relativiste, pour Mach, pour Einstein, et aussi pour Poincaré, la seule réalité est l'effet mécanique tangible. *On ne peut pas toujours savoir si un corps tourne ou non, mais on peut toujours constater si ses points sont soumis à l'action d'un certain champ de force ou non.*

C'est en partant de ce point de vue qu'Einstein (13) semble avoir conçu l'idée fondamentale de la théorie de relativité généralisée : L'effet d'un mouvement est dans certains cas indiscernable de celui d'un champ de force. Par rapport à un système de référence animé d'un mouvement uniformément accéléré les corps libres ont une accélération constante. Ils se comportent donc de la même façon que s'ils étaient soumis à l'action d'un champ de force constant.

On peut cependant, dans un grand nombre de cas, décider si l'effet dynamique est produit par le mouvement accéléré d'un système ou s'il est dû à l'action d'un champ de force. Le mouvement non uniforme d'un système de référence communique à *tous les corps libres la même* accélération; dans le champ d'une force, par contre, différents corps prennent, en général, des accélérations différentes. Dans un champ électrostatique, par exemple, un corps prendra une accélération plus ou moins grande suivant la grandeur de sa charge électrique. Il existe une seule exception à cette règle, à savoir le cas où la force est celle d'un *champ de gravitation*.

L'expérience classique du tube de Newton montre que tous les corps tombent dans le vide avec la même rapidité. Le champ de gravitation de la terre communique donc à tous les corps la même accélération; en d'autres termes, il y a proportionnalité entre la *masse inerte* et la *masse pondérable* des corps. Un choix convenable des unités permet de rendre numériquement égales les deux espèces de masses, ce qu'on admet, du reste, dans la mécanique classique. Cette loi est-elle rigoureusement vraie?

Des vérifications extrêmement précises ont montré qu'elle est, en tous cas, l'une des plus précises de toute la physique expérimentale.

Un observateur enfermé dans une cage d'ascenseur où tous les objets sont attirés vers le fond, avec une force proportionnelle à la masse, supposera que tous les objets, ainsi que la cage elle-même, se trouvent immobiles dans un champ de gravitation invariable. Cependant, si *en absence de tout champ de gravitation*, la cage suspendue à une corde était tirée en haut avec une force constante et effectuait, indéfiniment, un mouvement ascendant uniformément accéléré, l'effet mécanique exercé sur la corde tendue et sur tous les objets à l'intérieur de la cage aurait exactement le même caractère.

En principe, une interprétation purement cinématique de la gravitation est possible. Objectivement, il n'y a aucune différence entre les « forces d'inertie », la force centrifuge par exemple, et les forces de gravitation. Les unes sont aussi réelles que les autres ; il n'existe pas de forces fictives.

Si l'on abandonne la notion des repères absolus le système galiléen est indéfinissable. Les lois de la mécanique doivent avoir le même caractère par rapport à n'importe quel système de référence quel que soit son état de mouvement. Ici nous rejoignons le sujet qui nous a occupés précédemment.

La cinématique, nous l'avons vu, n'est autre chose que la géométrie d'un continu à quatre dimensions, mais, étant donné le vrai caractère du problème de la relativité, ce continu doit avoir effectivement d'autres propriétés métriques que celles attribuées au continu de Minkowski.

(A suivre.)
