

La relativité aujourd'hui

- Dans l'esprit du public, la relativité reste une théorie ésotérique et mystérieuse, « que seuls dix savants au monde peuvent comprendre ». Elle est pourtant vérifiée régulièrement par les innombrables expériences conduites sur les particules de haute énergie et enseignée journallement à des dizaines de milliers d'étudiants débutants.
- Dans le cadre de la physique classique, la relativité « restreinte », véritable géométrie de l'espace-temps, régit aujourd'hui les théories quantiques. Elle sous-tend toutes les tentatives de compréhension du monde sub-nucléaire.
- La relativité générale, autre volet de l'oeuvre d'Einstein fut une création solitaire. Elle joue un rôle majeur dans l'explication de nombreuses observations astrophysiques récentes. Elle est partie prenante dans notre compréhension globale de l'univers physique.

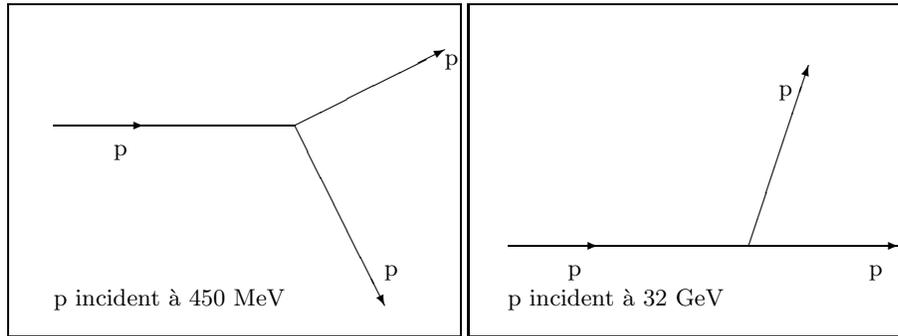
Einstein n'a pas inventé la relativité. D'ailleurs il y en a plusieurs. Et puis ces théories, très mal nommées, s'intéressent à l'absolu beaucoup plus qu'au relatif. Quant à la « relativité générale », si c'est bien Einstein qui l'a fondée, elle n'est justement pas générale... On peut continuer ainsi et prendre à contrepied, de façon presque systématique, le catalogue des idées courantes sur l'origine et la signification de la relativité. C'est que ces idées reçues le sont depuis plus d'un demi-siècle : elles ont eu largement le temps de s'user.

Les débats métaphysiques ou idéologiques et même épistémologiques à propos de la relativité sont aujourd'hui caducs : les critiques de Bergson comme celles de Jdanov sont oubliées... Il subsiste néanmoins une confusion d'autant plus grande qu'elle est implicite.

Si des incompréhensions analogues entourent presque tous les acquis de la physique moderne, elles sont particulièrement graves dans le cas de la relativité qui traite de deux des catégories les plus fondamentales de la pensée : l'espace et le temps. Toute mise en cause de la compréhension courante de ces notions est nécessairement ressentie comme une atteinte douloureuse. Or il est vrai qu'Einstein nous a obligés à considérablement modifier nos idées sur l'espace et le temps ; pourtant, le « nous » de la phrase qui précède ne désigne à proprement parler que les physiciens, contraints d'abandonner la conception classique qui remontait à Galilée et Newton. Quant aux profanes, l'ironie de l'histoire veut qu'ils aient réagi aussi violemment à la vision einsteinienne, alors qu'était loin d'être assimilée la conception newtonienne elle-même. Dans la vie

quotidienne et même dans le domaine de la technique usuelle, le recours aux concepts théoriques de la physique classique est rarement nécessaire. Ainsi la conception courante de l'espace et du temps, essentiellement empirique, est-elle aujourd'hui encore largement aristotélicienne – et à juste titre ! – y compris chez les physiciens.

Voir la relativité :



Il n'est pas si facile de visualiser directement une situation où la mécanique classique, newtonienne, est invalidée de façon patente. Aussi confirmée soit aujourd'hui la relativité einsteinienne, elle l'est en général de façon indirecte. Voici pourtant un cas où sa nécessité est immédiatement visible. Lorsqu'un projectile vient heurter un objet immobile de même masse, et lui communique une partie de son énergie, la forme newtonienne des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement amène à prédire que les corps, après leur collision, s'éloignent sur des trajectoires faisant entre elles un angle droit. C'est bien ce que l'on constate lorsqu'on photographie la collision de deux protons (dont l'un initialement au repos) de basse énergie (450 MeV). La mécanique einsteinienne, par contre, modifie cette prédiction et prévoit un angle aigu, différant d'autant plus de l'angle droit que l'énergie de la particule incidente est plus élevée. L'expérience (à 32 GeV) confirme la théorie.

Le scandale einsteinien n'est ainsi que l'effet retardé du choc galiléo-newtonien. Nombre de (pseudo) paradoxes de la théorie einsteinienne ont déjà des équivalents dans la théorie classique ; quant aux plus spécifiques d'entre eux, les décennies écoulées les ont dépouillés d'une grande part de leur mystère aux yeux des physiciens contemporains. Tentons donc d'éclairer quelques aspects de la relativité telle qu'elle se présente dans la physique actuelle.

Le principe de relativité sauvé par l'abandon de la théorie galiléenne

Si Einstein n'a pas inventé la théorie de la relativité, il a mis au jour *une* théorie de la relativité, venue remplacer celle, jusqu'alors « évidente », qui remontait à Galilée et Newton. Il faut en effet distinguer l'idée même de relativité, le *principe de relativité*, des théories diverses qui peuvent l'exprimer. Ce principe affirme, en termes simples, qu'il existe sur l'univers physique des points de vue équivalents. Par « points de vue », j'entends ici ce que les physiciens explicitent sous le nom de « référentiel » : un système de référence à quoi sont rapportées les diverses grandeurs physiques. Ces grandeurs en effet sont *relatives* ; la position d'un corps ne peut être définie que par rapport à un autre, la vitesse d'un mobile également : ni la position, ni la vitesse d'un voyageur avançant dans le couloir d'un train en marche ne sont les mêmes suivant qu'on les rapporte à l'extrémité du dernier wagon ou à celle du quai de la gare. Il est donc nécessaire, a priori, lorsqu'on écrit une loi physique, c'est à dire une relation entre grandeurs physiques, de bien spécifier le référentiel utilisé, que ce soit par exemple le dernier wagon, ou le quai – ou un wagon de n'importe quel autre train. C'est alors qu'intervient le principe de relativité, pour exprimer l'existence de référentiels *équivalents*, c'est à dire de référentiels où les phénomènes de la physique ont même allure et les lois de la physique la même forme. Les grandeurs physiques elles-mêmes certes diffèrent de l'un de ces référentiels à l'autre : seules les relations où elles entrent sont les mêmes. Ainsi, si deux grandeurs sont, dans un certain référentiel, proportionnelles, soit $A = kB$, A et B étant les valeurs de ces grandeurs et k une constante, on aura dans un référentiel équivalent, la même relation de proportionnalité, $A' = kB'$, bien que les valeurs A' et B' dans le second référentiel a priori diffèrent des valeurs A et B dans le premier. Bien entendu, deux référentiels arbitraires en général ne sont pas équivalents. S'ils sont animés, l'un par rapport à l'autre, de mouvements quelconques, les lois de la physique y prendront des formes diverses. Ainsi, les phénomènes et les lois de la mécanique dans un manège en rotation diffèrent-ils de leur expression à l'arrêt par l'apparition de la fameuse « force centrifuge » : dans le manège arrêté, une bille posée sur le plancher reste immobile, mais s'il tourne elle prend un mouvement vers l'extérieur qui rend le mouvement de rotation perceptible pour les passagers du manège même en l'absence de toute autre observation. L'importance du principe de relativité vient précisément de son affirmation que, parmi la vaste infinité des référentiels possibles, il en existe certains qui sont équivalents, par exemple, des référentiels simplement décalés dans l'espace : les lois de la physique ont certainement la même expression dans un laboratoire français et un laboratoire américain. Moins triviale est l'équivalence découverte par Galilée, en une page célèbre où il souligne l'identité de description des phénomènes physiques dans la cale d'un bateau quand il se déplace à vitesse constante, en grandeur et en direction, autrement dit, d'un mouvement uniforme. C'est cette différence du mouvement – uniforme ! – qui constitue le coeur même du principe de relativité, entraînant ipso facto l'abolition de toute idée de mouvement absolu.

« La transformation de Galilée. » Le train roule à la vitesse constante (v) et l'arrière du dernier wagon passe à la hauteur du bout du quai à l'instant pris (par convention) comme origine. Après un temps t , le train a franchi une distance vt , qu'il suffit donc de retrancher à la position x d'un voyageur par rapport au bout du quai pour obtenir sa position x' par rapport à l'arrière du train : $x' = x - vt$. Ce raisonnement « évident » est invalidé lorsqu'on remarque qu'il n'y a aucune raison logique pour supposer que les étalons de longueur du train en mouvement coïncident avec ceux de la gare, de sorte qu'un coefficient de « parallaxe spatio-temporelle » peut très bien être introduit, $x' = \gamma(v)[x - vt]$, conduisant à la transformation de Lorentz.

Avec Galilée, bien avant Einstein, la théorisation de l'espace et du temps s'éloigne déjà de l'expérience quotidienne. Cela est encore plus net pour une conséquence immédiate du principe de relativité, assez fondamentale pour recevoir fréquemment le nom de principe : celui de l'inertie. Il affirme qu'un mobile sur lequel ne s'exerce aucune force se déplace uniformément – et non pas qu'il s'immobilise comme l'expérience ordinaire le laisserait croire. En effet un corps au repos dans un référentiel (le train) est du point de vue d'un référentiel équivalent (la gare) en mouvement uniforme, de sorte que ces deux états de mouvement doivent correspondre à une même caractérisation physique : l'absence de forces.

Reste à donner une expression concrète du principe, c'est à dire une théorie de la relativité qui précise comment sont liées les valeurs – en principe différentes – d'une même grandeur physique dans deux référentiels équivalents. Ces « formules de transformation », qui expriment le passage d'un référentiel à l'autre permettent alors de vérifier que la forme des lois physiques reste bien inchangée lors de ce passage. Les plus fondamentales de ces formules, sinon les plus importantes en pratique, concernent l'espace et le temps. Autrement dit, il faut savoir exprimer les coordonnées spatio-temporelles d'un événement, c'est à dire en repérer le lieu et l'instant, dans deux référentiels en mouvement relatif uniforme. Jusqu'en 1905, on tenait pour acquises les formules dites « galiléennes » évidentes, suivant lesquelles la position x' d'un certain événement par rapport au référentiel R' (la queue du train) était obtenue en soustrayant à sa position x par rapport au référentiel R (le bout du quai) la distance parcourue à la vitesse v pendant le temps t écoulé depuis le passage du train. Quant à ce temps écoulé, il allait de soi que c'était le même dans les deux référentiels. Ces formules :

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\ t' &= t\end{aligned}$$

sont d'une trivialité telle que nul ne s'avisa, ou presque, de les écrire – jusqu'à ce qu'on perçut leur caractère erroné ! Cette théorie ne faisait qu'exprimer certains aspects, tenus pour évidents, de la mécanique classique. C'est le développement, au XIX^e siècle, de l'électromagnétisme qui allait déclencher le conflit. En effet, la théorie électromagnétique synthétisée par Maxwell vers 1870 violait la relativité galiléenne ; la théorie de Maxwell prévoyait ainsi que la vitesse de la lumière

était invariante, ce qui est évidemment absurde du point de vue galiléen où la vitesse d'un mobile dépend toujours du référentiel utilisé.

Paradoxe ou parallaxe ? Contraction des longueurs et dilatation du temps :

Parmi les conséquences les plus choquantes de la théorie einsteinienne figurent la « contraction des longueurs » et « la dilatation des temps » : un objet en mouvement aurait ses dimensions accrues (dans le sens du déplacement) et son rythme d'évolution temporelle ralenti. Beaucoup d'encre a coulé pour discuter l'objectivité de ces phénomènes : une règle en mouvement est-elle « vraiment » plus courte que lorsqu'elle est immobile ? Une particule vitelle « vraiment » plus longtemps en déplacement qu'au repos ? L'expérience certes confirme la prédiction théorique : les muons issus des rayons cosmiques ont le temps d'arriver au sol en traversant l'atmosphère avant de se désintégrer. Ils parcourent ainsi plusieurs dizaines de kilomètres à une vitesse évidemment inférieure à celle de la lumière, soit 300 000 km/s. Leur trajet dure donc quelque dix-millièmes de seconde alors que leur durée de vie au repos est d'environ un millionième de seconde. Mais comment interpréter ces phénomènes ?

Il s'agit en fait tout simplement d'effets de perspective, ou plus précisément, de parallaxe, dans l'espace-temps, tout à fait analogues aux effets spatiaux usuels. Lorsque l'on désire mesurer la longueur d'un objet en le comparant à une règle graduée, il va de soi qu'on repère les extrémités de l'objet sur la règle de référence disposée parallèlement à la longueur que l'on veut mesurer. Si pour une raison quelconque ce parallélisme est impossible, l'obliquité de la règle par rapport à l'objet mesuré amènera la visée à repérer, par projection (perpendiculaire à sa direction propre) sur la règle, une longueur apparente plus grande. Cette « dilatation de la longueur » est l'effet de parallaxe, dû à ce que le repérage se fait sur une règle de référence dont la direction spatiale diffère de celle de l'objet. Il n'en reste pas moins que l'objet a bien une longueur intrinsèque qui s'obtient en disposant la règle parallèlement à sa direction propre ou, faute de mieux, en corrigeant la lecture par le facteur angulaire adéquat.

Utilisons la représentation graphique de l'espace-temps où un événement est repéré sur un plan par ses coordonnées temporelle et spatiale (nous ne gardons ici qu'une direction spatiale pour la commodité de l'illustration). Les axes matérialisent alors le référentiel utilisé, et un changement de référentiel se traduit par un changement d'axes. C'est le rôle des formules de transformation que de préciser la disposition relative (orientation et graduation) des axes correspondant à deux référentiels équivalents. Dans le cas de deux dimensions spatiales (euclidiennes), deux référentiels équivalents diffèrent par leur orientation et se déduisent l'un de l'autre par une simple rotation. Dans le cas spatio-temporel (einsteinien), la transformation dite de Lorentz est moins familière. Un objet de longueur L_0 dans son propre référentiel sera, dans un autre référentiel, repéré différemment et se verra attribué une longueur inférieure L . Mais, comme dans le cas spatial, c'est là un effet de parallaxe : ce n'est que si les axes spatio-temporels de l'objet coïncident avec ceux de la règle utilisée que l'on peut affirmer mesurer la longueur propre de l'objet. La dilatation des temps s'explique de façon analogue. Ces effets sont donc parfaitement « réels » tout en ne concernant que des « apparences ».

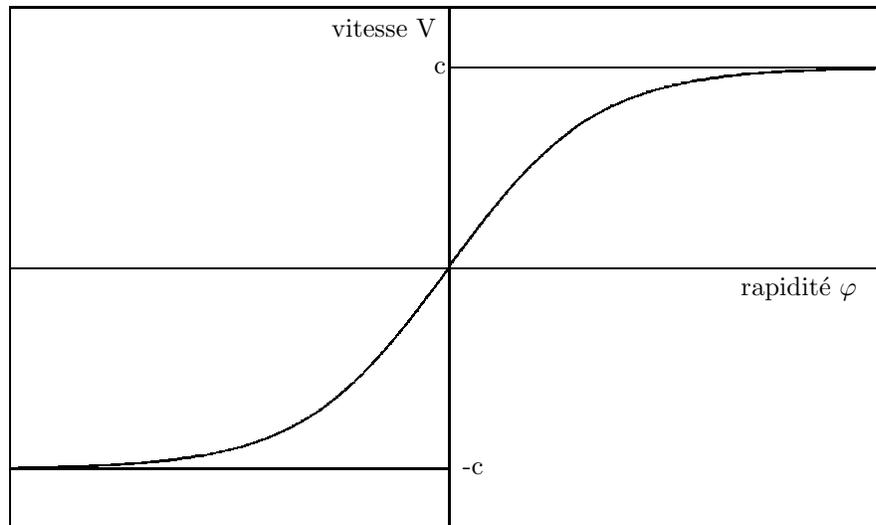
On pouvait cependant s'en tirer encore en supposant que les corps matériels, de par leur constitution électromagnétique, subissaient lors de leurs déplacements dans l'« éther », d'étranges contractions : c'est cette modification, subie par les instruments de mesure qui, compensant exactement la variation de vitesse de la lumière, expliquerait sa constance apparente. A la fin du XIX^e siècle, la physique s'orientait ainsi vers une étude détaillée des propriétés électromagnétiques de la matière qui aurait servi de base à la compréhension des propriétés apparentes, et paradoxales, de l'espace et du temps. Le grand mérite historique d'Einstein est d'avoir renversé cette démarche. Il proposa, plutôt que de résoudre

le problème posé par la divergence de l'électromagnétisme et de la relativité galiléenne, de l'éliminer en renonçant à la seconde. Le *principe* de relativité pouvait être sauvé, à condition de modifier la théorie. Adoptant les formules de transformation

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

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

la théorie électromagnétique devenait parfaitement relativiste, c'est à dire invariante par changement de référentiel. Einstein n'était pas le premier à écrire ces formules, d'ailleurs aujourd'hui appelées « formules de Lorentz », mais, avant lui, elles n'étaient interprétées qu'en un sens phénoménologique, requérant une explication plus profonde à partir de la constitution de la matière. Einstein au contraire, tout en les introduisant par une analyse essentiellement opérationnaliste (comment synchroniser des horloges au moyen de signaux lumineux, etc.), leur donna une position fondamentale. La physique contemporaine est profondément tributaire de cette innovation. Le caractère principal conféré par Einstein à la théorie de la relativité n'a fait que se renforcer. Si historiquement, la relativité (einsteinienne) découle de la théorie électromagnétique, l'enchaînement conceptuel est, du point de vue épistémologique actuel, renversé, et l'on peut regretter que ce renversement n'ait pas encore été universellement adopté sur le plan pédagogique.



Ne pas confondre vitesse et rapidité :

La notion de vitesse est, en théorie einsteinienne de la relativité, une source fréquente de confusions et de pseudo-paradoxes. La troublante existence d'une vitesse limite c (celle de la lumière) exige en effet une loi de composition bizarre, où les vitesses ne s'ajoutent pas de façon simple comme en théorie galiléenne. Au lieu de l'expression $v' = v + V$ pour la vitesse v' d'un mobile dans un référentiel R' en mouvement uniforme à la vitesse V par rapport au référentiel R où la vitesse est v , on a ici $v' = \frac{v+V}{1+vV/c^2}$ (de sorte que si $v = c$, on a bien $v' = c$ aussi). La plupart des difficultés conceptuelle disparaissent si l'on introduit la notion de *rapidité*. La rapidité φ d'un mobile de vitesse v est définie par l'expression $v = c \tanh \varphi$, relation représentée par la figure ci-dessus. Il est aisé de voir que la rapidité prend des valeurs numériques quelconques, sans plus de limitation. Surtout, elle obéit à une loi de composition additive simple : $\varphi' = \varphi + \phi$, où φ' et φ sont les rapidités du mobile par rapport aux deux référentiels R' et R , et ϕ la rapidité relative de ces deux référentiels. On voit également que pour des vitesses faibles devant celle de la lumière, vitesse et rapidité, au facteur numérique c près, se confondent : $v \simeq c\varphi$ pour $v \ll c$. C'est donc que le concept galiléen de vitesse rassemble en lui des propriétés qui, dans le cas général, einsteinien, appartiennent à deux grandeurs différentes – bien que liées : le taux de variation temporelle de la distance d'une part, le paramètre additif du mouvement d'autre part. En d'autres termes, là où il y a une vitesse galiléenne, il y en a deux einsteiniennes : la première que l'on a par abus de langage implicite continué à appeler « vitesse » ; la seconde, qui a été baptisée « rapidité ». Toutes deux doivent être introduites et leur considération simultanée seule peut fournir une généralisation adéquate du concept de vitesse. Aujourd'hui, la notion de rapidité est couramment utilisée par les physiciens. Son introduction à peu près générale (quoique depuis peu) dans l'enseignement élimine nombre de difficultés pédagogiques.

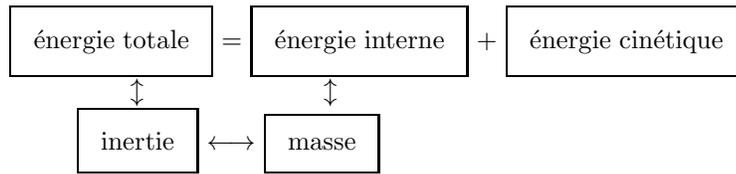
Une situation très semblable existe en géométrie élémentaire appliquée à la topographie, lorsqu'on veut caractériser l'inclinaison d'une pente. On dit par exemple que la pente d'une route est de 5% si la dénivellation est de 5 m pour une distance de 100 m. Ces pentes, tant qu'elles sont faibles, s'ajoutent, en ce sens qu'une direction présentant une pente de 3% par rapport à une colline de pente 5% (par exemple la ligne de visée d'un théodolite) a une pente de 8% par rapport à l'horizontale. Il est clair, cependant, que pour des pentes importantes cette additivité ne vaut plus. Il faut alors introduire un paramètre θ , lié à la pente t par la relation $t = \tan \theta$. Ce paramètre θ n'est autre que l'angle qui, par essence, est additif. Une direction présentant un angle de Θ par rapport au flanc d'une colline faisant elle-même avec l'horizontale un angle de θ s'écarte de l'horizontale d'un angle $\theta' = \theta + \Theta$. Les pentes correspondantes, par contre, sont liées par la relation exacte $t' = \frac{t+T}{1-tT}$ (dont la ressemblance avec la relation einsteinienne de composition des vitesses sous-tend une analogie mathématique profonde). Pour de petits angles, la tangente et l'angle sont presque confondus et la distinction est inutile, comme celle de la vitesse et de la rapidité dans le cas galiléen.

Une « super-loi » physique.

Depuis trois quarts de siècle, on a dû reconnaître l'existence, à côté des interactions électromagnétiques, d'autres interactions qui régissent les particules fondamentales à très petite échelle. Ces interactions, dites « fortes » et « faibles », constituent le domaine d'étude essentiel de la physique des particules. Or, si elles se révèlent des plus complexes, une de leurs caractéristiques jusqu'ici incontestée est d'obéir à la théorie de la relativité einsteinienne. Celle-ci est ainsi vérifiée quotidiennement par les milliers d'expériences conduites sur les particules de haute énergie. Dans ce domaine particulier de la physique, la relati-

vité, loin d'être une théorie ésotérique aux effets élusifs, forme le cadre même de la conception et de l'analyse des expériences. Elle est véritablement matérialisée par le fonctionnement des gigantesques accélérateurs de particules. Sur le plan théorique, elle sous-tend toutes les tentatives de compréhension du monde sub-nucléaire. Née dans le cadre de la physique classique, elle règne désormais de façon tout aussi contraignante sur les théories quantiques. Décrivant des propriétés générales universelles de l'espace et du temps, arène où se déroulent les phénomènes physiques, la relativité constitue aujourd'hui, suivant le mot de Wigner, une « super-loi » physique : l'invariance relativiste est une condition nécessaire de validité pour toute théorie nouvelle.

Masse, inertie, énergie :



↑↓ identification en théorie einsteinienne
 ↔ identification en théorie galiléenne

Nombre d'énoncés vulgarisateurs ou didactiques de la relativité einsteinienne insistent sur la variabilité de la masse avec la vitesse. Il faut prendre garde ici aux abus de langage. En mécanique newtonienne, régie par la relativité galiléenne, la notion de masse a un contenu double. Elle dénote d'une part la quantité de matière intrinsèquement contenue dans un objet physique, et d'autre part son coefficient d'inertie, mesure de la difficulté à modifier l'état de mouvement de l'objet. Ces deux quantités sont universellement proportionnelles, et, moyennant un choix convenable d'unités, peuvent être identifiées. En relativité einsteinienne au contraire, ces deux notions se découplent. On réserve de nos jours le nom de masse à la première, qui, par essence, caractérise l'objet indépendamment de son mouvement ; la masse est donc une quantité invariante. L'inertie, par contre, est ici proportionnelle à l'énergie et augmente donc bien avec la vitesse ; elle croît même indéfiniment quand la vitesse approche de la vitesse-limite, ce qui entraîne l'impossibilité d'atteindre effectivement cette dernière. Quant à la (trop) fameuse formule $E_0 = mc^2$ il faut aujourd'hui la comprendre comme identifiant, au facteur c^2 près, la masse d'un objet, au sens intrinsèque ci-dessus, avec son énergie *interne*, propriété invariante elle aussi (d'où l'indice 0). L'énergie totale se compose de cette énergie interne et de l'énergie cinétique, due au mouvement ; l'énergie interne est aussi l'énergie « au repos », lorsque l'énergie cinétique est nulle. Il y a donc une grande différence entre la relativité galiléenne et la relativité einsteinienne. Pour la première, masse et inertie sont identiques, constantes et indépendantes de l'énergie. Pour la seconde, masse et inertie diffèrent, la masse s'identifie à l'énergie interne, l'inertie à l'énergie totale. En théorie einsteinienne, seule est conservée l'énergie (totale). On voit la subtilité des relations entre les deux théories – la première étant néanmoins une approximation de la seconde – et tous les risques d'incompréhension que comportent les nécessaires abus de langage par quoi l'on utilise la même dénomination (« masse », « énergie ») pour des concepts certes analogues, mais non homologues.

La théorie de la relativité est donc une véritable géométrie de l'espace-temps, qui régit le travail du physicien avec autant de force que la géométrie spa-

tiale ordinaire régit celui de l'architecte. Peu de temps après la percée einsteinienne (1905), Minkowski puis Weyl donnèrent à la relativité une formulation mathématique répondant à la conception moderne de la géométrie : l'étude dans un certain espace de ses propriétés invariantes par un certain *groupe* de transformations. La structure de groupe, sans nul doute l'une des plus importantes de la mathématique, trouve ici un vaste champ d'application. La géométrie spatiale usuelle est liée au groupe euclidien (translations et rotations) ; la relativité correspond au « groupe de Lorentz », engendré par les transformations de Lorentz (en sus des rotations spatiales). Dans cette conception, l'accent est mis sur les propriétés *invariantes*. Ce sont elles en effet qui expriment les aspects intrinsèques, absolus, de l'espace étudié. Ainsi en géométrie ordinaire, la distance entre deux points est-elle un invariant euclidien (contrairement, par exemple, aux composantes, dans un certain système de coordonnées, du segment joignant ces points). De façon plus générale, les grandeurs physiques sont classées selon leur mode de transformation lors des changements de référentiels. La théorie des groupes et le calcul tensoriel permettent de dégager certains types canoniques de variance (ainsi la notion de vecteur à trois dimensions a-t-elle un analogue immédiat dans l'espace-temps quadridimensionnel). L'utilisation de tels invariants ou covariants permet une grande amélioration des calculs théoriques, et la comparaison d'ouvrages modernes à ceux d'il y a un demi-siècle montre les progrès effectués. Comme toujours, la condensation de l'écriture révèle un approfondissement conceptuel plus encore qu'une économie formelle. La théorie de la relativité apparaît donc assez mal dénommée du point de vue moderne, comme le remarquait déjà Sommerfeld il y a 50 ans, puisque son rôle est finalement de dégager des propriétés physique invariantes, absolues (indépendantes du référentiel).

Admettons que les équations de Maxwell-Hertz soient valables pour le système au repos K , de sorte qu'on ait :

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \frac{\partial X}{\partial t} &= \frac{\partial N}{\partial y} - \frac{\partial M}{\partial x}, & \frac{1}{V} \frac{\partial L}{\partial t} &= \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial y}, \\ \frac{1}{V} \frac{\partial Y}{\partial t} &= \frac{\partial L}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial z}, & \frac{1}{V} \frac{\partial M}{\partial t} &= \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial z}, \\ \frac{1}{V} \frac{\partial Z}{\partial t} &= \frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial L}{\partial y}, & \frac{1}{V} \frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{\partial X}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial x}, \end{aligned}$$

où (X, Y, Z) signifient le vecteur de la force électrique, (L, M, N) celui de la force magnétique.

46. Equation des ondes

Un champ électromagnétique dans le vide est déterminé par les équations de Maxwell, dans lesquelles il faut poser $\rho = 0$, $\mathbf{j} = \mathbf{0}$.

Ecrivons-les encore une fois :

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\mathbf{E} &= -\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}, & \operatorname{div}\mathbf{H} &= 0, \\ \operatorname{rot}\mathbf{H} &= \frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}, & \operatorname{div}\mathbf{E} &= 0. \end{aligned}$$

Ces équations peuvent admettre des solutions non nulles. Cela signifie que le champ électromagnétique peut exister même en l'absence de charges.

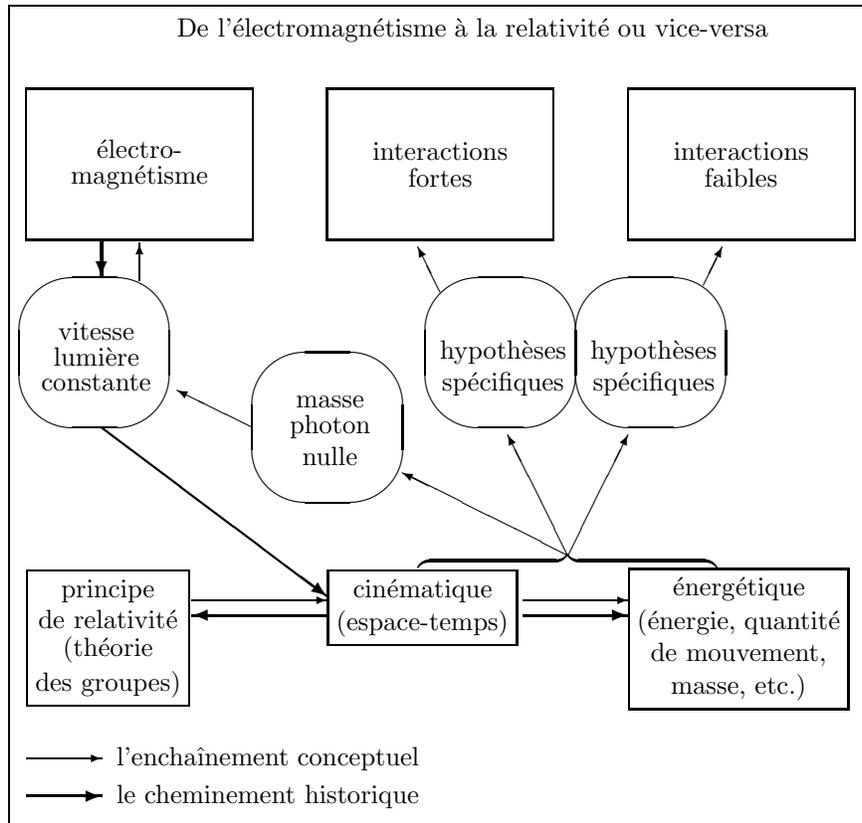
Nous allons déduire à nouveau l'équation des ondes sous forme quadridimensionnelle. Nous écrivons à cet effet le deuxième groupe d'équations de Maxwell pour un champ en l'absence de charges sous la forme :

$$\frac{\partial F^{ik}}{\partial x^k} = 0$$

« Des formules de la relativité à la relativité des formules. » L'écriture des formules qui expriment une loi physique dépend du cadre théorique général où s'inscrit cette loi. L'élargissement de ce cadre, traduisant l'approfondissement des concepts, permet en général une expression de plus en plus synthétique. Cette économie formelle se manifeste clairement sur l'apparence des équations de Maxwell, qui régissent le champ électromagnétique. En (a), la forme d'une partie de ces équations telle que les écrit Einstein lui-même dans son mémoire de 1905. En (b), la forme « vectorielle » des équations dans le traité moderne de Landau et Lifshitz, et en (c), dans le même ouvrage, une forme « covariante » qui incorpore complètement la théorie de la relativité.

L'abstraction consolidatrice, si elle a très vite permis la reformulation de la théorie, n'en a longtemps que peu affecté l'interprétation et les fondements. Malgré la généralité du point de vue géométrique et l'universalité de son application à tous les types d'interactions, les bases mêmes de la relativité sont aujourd'hui encore très souvent liées à la catégorie particulière des phénomènes physiques électromagnétiques. Dans la construction einsteinienne initiale, l'invariance de la vitesse de la lumière, ou plus généralement la forme des équations de Maxwell pour le champ électromagnétique, servaient de pierre angulaire. Mais il paraît nécessaire maintenant de prendre à rebours l'ordre historique : l'invariance de la vitesse de la lumière se comprend aujourd'hui comme découlant du fait que le photon, particule élémentaire médiatrice de l'électromagnétisme, possède une masse nulle. Il découle alors de la théorie que sa vitesse est égale à la vitesse limite ; mais c'est aussi le cas du neutrino, au moins si sa masse est bien nulle. Il se pourrait en effet que photon et neutrino aient des masses infimes mais non nulles et ne se déplacent qu'approximativement à la vitesse limite. Ce fait cependant n'invaliderait en rien la théorie de la relativité. C'est au contraire elle qui servirait à établir une forme modifiée de la théorie électromagnétique,

comme elle sert aujourd'hui à construire la théorie de Maxwell. On sait maintenant construire l'édifice conceptuel de la relativité à partir d'hypothèses très générales ne concernant que la structure de l'espace-temps, sans suppositions particulières concernant tel phénomène physique, propagation de la lumière ou autre. Cette construction théorique de la relativité repose de façon essentielle sur la théorie des groupes de transformation. Il est intéressant de remarquer que cette modification, abstraite et générale, des bases de la relativité a, elle aussi, vu le jour dès 1910 (Ignatowski, Frank, Rothe). Elle est pourtant restée largement ignorée et fut redécouverte périodiquement par divers chercheurs; elle ne semble que depuis très peu de temps en mesure d'être reconnue, sinon généralement admise.



Il y a là un exemple frappant de retard à la refonte d'une théorie physique, retard très certainement lourd de conséquences épistémologiques et pédagogiques. Nous devons en particulier reconnaître maintenant que la théorie de la relativité repose sur des bases d'une solidité telle qu'il est très difficile de lui trouver des généralisations ou des modifications plausibles. L'idée est en effet naturelle d'envisager un remplacement futur de la théorie einsteinienne, comme elle a remplacé la théorie galiléenne. Cependant, la construction d'une théorie de la

relativité sur les bases générales évoquées aboutit nécessairement à la théorie einsteinienne, ou à son approximation galiléenne, mais non à une théorie plus générale (une légère réserve doit être apportée à cette assertion, mais elle est trop technique pour nous concerner ici). Une éventuelle contradiction de provenance expérimentale constituerait donc un ébranlement majeur de la physique théorique.

La relativité générale : la fin d'un splendide isolement

La théorie de la relativité einsteinienne dont il a été question jusqu'ici est souvent appelée « relativité restreinte » par opposition à la « relativité générale ». Alors que le rôle d'Einstein dans la première fut de couronner brillamment et de façon décisive les travaux de toute une génération de théoriciens, la seconde fut une création solitaire, le dernier exemple peut-être d'une œuvre individuelle dans la physique moderne. L'objectif d'Einstein était de construire une théorie de la gravitation (à l'époque la seule interaction reconnue en sus de l'électromagnétisme) adéquate à la nouvelle conception de l'espace-temps, comme la théorie de Newton l'était à l'ancienne. Einstein partit de la remarque élémentaire mais profonde de l'identité entre masse inertielle (le coefficient d'inertie, traduisant la résistance d'un corps à la modification de son état de mouvement) et la masse gravitationnelle (la « charge » gravitationnelle, devrait-on dire plutôt, qui exprime l'intensité des interactions gravitationnelles exercées sur, et par, un corps). Il résulte de cette identité que la trajectoire d'un corps dans un champs de gravitation ne dépend pas de sa masse ; un satellite artificiel de 1 tonne et un poussière de 1 mg placés initialement avec la même vitesse à la même altitude suivront autour de la Terre la même orbite, le premier subissant une force un milliard de fois supérieure à la seconde, mais y répondant avec une inertie un milliard de fois supérieure aussi. Les trajectoires gravitationnelles sont donc indépendantes des propriétés physiques, et peuvent être caractérisées de façon purement géométrique. Einstein construisit ainsi une théorie géométrique de la gravitation, où les « forces » de type newtonien sont remplacées par des modifications locales, « courbures » de l'espace-temps. Ce point de vue l'amena naturellement à employer le formalisme de la géométrie différentielle et à exprimer la théorie sous une forme qui fut valable dans n'importe quel référentiel, et non seulement dans les référentiels en mouvement relatif uniforme de la relativité « restreinte ». De là provient l'appellation de « relativité générale ». Là encore, cependant, il convient de ne pas confondre la construction de la théorie avec son interprétation, sa genèse avec son exégèse. Plusieurs théoriciens notèrent assez rapidement que l'exigence de relativité générale, à savoir la possibilité de formuler la théorie dans n'importe quel référentiel était en soi dépourvue de sens physique et pouvait être imposée à toute théorie (moyennant, grosso modo, l'introduction de termes du type « force centrifuge » caractérisant la nature arbitraire du référentiel). Inversement, et c'est un débat encore actuel, il se pouvait que cette équivalence formelle de tous les référentiels masquât le rôle privilégié de certains d'entre eux. Enfin, la découverte des interactions nucléaires, fortes et faibles, affaiblit considérablement l'espoir d'une géométrisation totale

de la physique : des tentatives plus ou moins heureuses furent faites pour intégrer l'électromagnétisme dans une théorie « unifiée », mais les interactions nucléaires restèrent rebelles. Si l'on ajoute que les effets spécifiques prévus par la relativité générale, la distinguant de la théorie newtonienne classique, étaient faibles et limités, on comprend qu'elle resta longtemps dans un splendide isolement.

Depuis une quinzaine d'années la situation a bien changé. Les progrès des observations astrophysiques ont conduit à étudier des situations de plus en plus nombreuses où s'imposait le recours à une théorie relativiste (au sens einsteinien) de la gravitation. La découverte des pulsars a montré qu'il existe des objets (étoiles à neutrons) d'une densité telle qu'en leur voisinage la courbure de l'espace, pour utiliser la terminologie orthodoxe, n'est plus un épiphénomène mais un aspect essentiel de la situation physique. Ceci serait encore plus vrai pour les « trous noirs » encore hypothétiques mais objets de recherche acharnées, comme les ondes gravitationnelles, qui ne sont même pas concevables dans l'espace-temps newtonien, pas plus que les ondes électromagnétiques. La cosmologie enfin, quand elle étudie « les trois premières minutes de l'univers », s'appuie également sur la relativité générale. Celle-ci constitue donc le cœur théorique d'un très actif domaine de la physique. Cependant, la relativité générale n'est pas la seule théorie de la gravitation possible en accord avec la relativité « restreinte », et une partie des recherches vise précisément à éprouver la validité de ces diverses théories. Si plusieurs d'entre elles, pourtant séduisantes à certains égards (comme celle de Brans-Dicke), sont pratiquement éliminées, la relativité générale jusqu'à présent tient bon ; sa cohérence et sa simplicité lui permettent en outre de conserver un statut privilégié. Cette permanence n'exclut cependant pas d'importantes modifications dans son interprétation et sa compréhension. C'est ainsi que se développe un courant de « dégéométrisation » de la relativité générale. Il est en effet possible de construire une théorie relativiste de la gravitation sur le modèle de l'électromagnétisme et des autres interactions, c'est à dire comme une théorie de champ. Avec des hypothèses fort naturelles, on arrive ainsi à une théorie formellement identique à la relativité générale, donc entraînant les mêmes conséquences physiques, mais conceptuellement différente : l'espace-temps y est celui de la relativité « restreinte », sans courbure, où règne un champ de gravitation qui simule une telle courbure. La gravitation perd ainsi le privilège incompréhensible qu'elle semblait détenir et sa théorie n'est plus « générale », ni même une « relativité ». Ce point de vue, né pour l'essentiel à partir de la physique des hautes énergies, traduit l'actuelle hégémonie des théories de champ (classiques et quantiques) sur toute la physique. Des idées – encore problématiques – comme celle de la « supergravitation » et des « théories de jauge », laissent espérer une possible unification dans ce cadre des théories physiques décrivant diverses interactions. Cette réalisation de l'objectif qu'Einstein poursuivait en vain pendant ses trente dernières années serait ainsi obtenue dans une direction exactement identique à celle qu'il suivait mais en sens opposé : au lieu de géométriser toutes les autres interactions comme la gravitation, on rend à celle-ci son statut de théorie de champ. Nul doute que l'humour de la situation aurait amusé Einstein.

POUR EN SAVOIR PLUS

Marie-Antoinette Tonnelat, *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris, 1974.

E.F. Taylor et J.A. Wheeler, *A la découverte de l'espace-temps*, Dunod, Paris.

J.-M. Lévy-Leblond, *Les relativités*, Cahiers de Fontenay n^o 8, E.N.S. de Fontenay-aux-roses, sept. 1977.

W. Rindler, *Essential Relativity*, Springer-Verlag, New York, 1977.