

De la relativité à la chronogéométrie*
ou :
Pour en finir avec le "second postulat" et autres fossiles

Jean-Marc Lévy-Leblond
Physique Théorique, Université de Nice

Les idées, pas plus que les êtres, ne naissent adultes. C'est plutôt dans la confusion qu'elles apparaissent d'abord, embarrassées des notions mêmes qu'elles vont invalider, et formulées en des termes inappropriés et bientôt caducs. C'est pourquoi les "révolutions scientifiques" ne suffisent pas à l'avancée de nos savoirs ; il faut que leur succèdent des temps de "refonte" (Bachelard), qui permettent l'épuration, la stabilisation (provisoire) et la reformulation des théories nouvelles. Ironiquement, la physique "moderne", celle du siècle désormais passé, a connu des processus de refonte beaucoup moins naturels et beaucoup moins efficaces que la physique "classique" du dix-neuvième siècle¹. De ce point de vue, la relativité tout comme la quantique sont restées, quant à la forme usuelle de leurs exposés, dans un état relativement archaïque, bientôt un siècle après leur naissance. Le contraste est frappant entre leur faible évolution conceptuelle et terminologique et celle, intense, qu'avaient rapidement connues, peu de décennies auparavant, l'électromagnétisme ou la thermodynamique. Bien des mots et même des concepts qui semblent caractéristiques des conceptions contemporaines ne sont en fait que des fossiles vivants, véritables coelacanthes intellectuels².

Peu de théories scientifiques ont suscité autant de malentendus que la "relativité d'Einstein". C'est à Galilée d'abord, et non à Einstein, que l'on doit, sinon le terme, du moins l'idée de relativité. Il est ironique de constater que le choc culturel qui suivit la divulgation des théories d'Einstein au début du siècle n'était en vérité que l'effet retardé de quatre siècles de la coupure instituée entre la conception commune de l'espace et du temps et sa théorisation par la physique classique. Dans un très beau passage du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632), Galilée écrit : « Si donc un peintre avait commencé, en quittant le port [de Venise] à dessiner avec une plume sur un papier et continué à le faire jusqu'à Alexandrie, il aurait pu tracer à la plume toute une histoire avec beaucoup de figures aux contours parfaits et hachurés en mille et mille directions, avec des villages, des édifices, des animaux et toutes sortes d'autres choses, et pourtant tout le mouvement véritable, réel et essentiel de la plume n'aurait été qu'une ligne très longue mais toute simple ; le peintre, lui, pour ce qui est de son opération propre, aurait tracé exactement les mêmes lignes que si le navire était resté immobile. »³ En d'autres termes, la description d'un phénomène est nécessairement relative au point de vue adopté (le physicien parle de "référentiel"), mais, et c'est là l'essentiel, il existe des points de vue équivalents : pour le peintre à son bord, le mouvement du bateau est « comme rien » (Galilée encore). Le principe de relativité affirme l'identité des lois de la physique dans tous les référentiels équivalents.

* Ce texte peut-être lu, au choix, comme un résumé développé ou comme un article abrégé ; il vise essentiellement à renvoyer à la bibliographie donnée dans les références.

Cet énoncé est loin d'être trivial : il ne proclame l'équivalence que de référentiels en mouvement relatif uniforme (à vitesse constante). Des mouvements accélérés ne sont pas « comme rien » : nous avons tous l'expérience des sensations physiques dues à l'accélération ou au freinage d'un véhicule ; il existe donc des référentiels *non-équivalents*, c'est même le cas le plus courant. Reste à transformer le principe général en une théorie spécifique, qui indique comment sont reliées les grandeurs physiques mesurées dans deux référentiels équivalents — comment est vu le dessin du point de vue du bateau, ou de celui du port. Les formules qui permettent le passage d'un référentiel à un autre dans le cadre de la mécanique classique sont fort simples et pratiquement évidentes ; elles affirment, par exemple que le temps, quant à lui, est le même quoique l'espace se transforme (comme dans l'exemple du dessin de Galilée). C'est avec cette théorie de la relativité (dite galiléenne par hommage rétroactif) que rentra en conflit l'électromagnétisme de Maxwell, et en particulier l'invariance de la vitesse de la lumière qu'il impliquait. Plutôt que de renoncer au principe de relativité, Einstein montra en 1905 comment le sauvegarder en en modifiant l'expression, illustrant ainsi le fameux adage du prince de Salinas dans *Le guépard* : « Il faut que tout change pour que rien ne change... ». Des formules de transformation plus sophistiquées (dites de Lorentz) permettent en effet d'énoncer l'équivalence des référentiels d'une façon compatible avec la théorie de Maxwell. Ces formules prédisent, et l'expérience vérifie amplement, diverses distorsions spatio-temporelles entre deux points de vue, mais ces effets a priori étranges ne sont guère que l'analogie des effets de perspective (ou plus précisément de parallaxe) dans l'espace ordinaire⁴.

L'ironie de l'histoire veut que, du point de vue moderne, l'accent soit mis beaucoup moins sur les aspects relatifs de cette conception de l'espace-temps que sur ses aspects absolus : plutôt qu'aux grandeurs qui dépendent du référentiel, on s'intéresse à celles qui n'en dépendent pas — telle la vitesse-limite (celle de la lumière) justement, ou à l'intervalle d'espace-temps dans la métrique minkowskienne. La dénomination de "relativité" est au fond assez mal choisie, comme Einstein lui-même, répondant à une remarque critique de Sommerfeld au début des années 1920, finit par en convenir. On peut à bon droit voir dans ce choix terminologique les effets du contexte culturel du bouillonnant début de siècle à Zürich où vivait le jeune Einstein — tout comme Lénine et Tristan Tzara, dans une ambiance propice aux remises en cause et à la relativisation des idées reçues⁵. Cette résonance fut encore accentuée lorsque se développa massivement l'écho public, souvent dénaturé, de la théorie, dans les années d'un après-guerre sceptique et friand de nouveautés⁶. Il serait plus judicieux aujourd'hui de parler de "chronogéométrie", puisqu'il s'agit d'une théorie traitant de la structure de l'espace-temps, tout comme la géométrie usuelle traite de celle de l'espace.

Se pose alors à nouveaux frais la question du fondement de cette théorie. Celui sur lequel on la fait usuellement reposer est double :

- le "premier postulat", qui n'est autre que le principe de relativité général déjà énoncé,
- le "second postulat", qui affirme l'invariance de la vitesse de la lumière, la même dans tous les référentiels.

C'est bien à partir de ce second postulat qu'Einstein, en 1905, établit les formules de transformation de Lorentz, par une analyse essentiellement operationaliste des mesures spatio-temporelles (telle la synchronisation des horloges). Mais cette construction est fort insatisfaisante sur le plan épistémologique et soulève des objections de deux ordres.

D'une part, si la relativité est fondée sur une propriété spécifique de la propagation des signaux lumineux, on comprend bien qu'elle s'applique à l'électromagnétisme, beaucoup moins bien qu'elle régit aussi les autres types d'interaction (fortes, faibles) découverts depuis. En d'autres termes, le domaine d'application de la théorie — universelle — est bien plus étendu que sa base traditionnelle ne le laisserait penser. D'autre part, nous savons aujourd'hui que l'invariance de la vitesse de la lumière est une conséquence de la nullité de la masse du photon. Mais, empiriquement, cette masse, aussi faible soit son actuelle borne supérieure expérimentale, ne peut et ne pourra jamais être considérée avec certitude comme rigoureusement nulle. Il se pourrait même que de futures mesures mettent en évidence une masse infime, mais non-nulle, du photon ; la lumière alors n'irait plus à la "vitesse de la lumière", ou, plus précisément, la vitesse de la lumière, désormais variable, ne s'identifierait plus à la vitesse limite invariante. Les procédures opérationnelles mises en jeu par le "second postulat" deviendraient caduques ipso facto. La théorie elle-même en serait-elle invalidée ? Heureusement, il n'en est rien ; mais, pour s'en assurer, il convient de la refonder sur des bases plus solides, et d'ailleurs plus économiques. En vérité, le "premier postulat" suffit, à la condition de l'exploiter à fond. Car le principe d'invariance renvoie immédiatement à l'existence d'une structure de groupe, et la contrainte puissante qu'exprime une telle structure permet d'aboutir sur la seule base d'hypothèses très générales, à la chronogéométrie einsteinienne — ou au cas particulier de son approximation classique, la chronogéométrie galiléenne⁷.

Il suffit en effet d'exiger que le groupe d'invariance spatio-temporelle soit compatible avec l'isotropie de l'espace et avec l'existence de relations causales pour qu'émerge le groupe de Lorentz⁸. Il est caractérisé par une constante structurelle c , qui se trouve jouer le rôle de vitesse limite⁹ ; reste à se tourner vers l'expérience pour connaître la valeur de cette constante (qui, si elle se trouvait être infinie, conduirait au groupe de Galilée). Sous sa forme la plus élémentaire, cette démarche présuppose la linéarité des transformations spatio-temporelles. Mais cette restriction peut même être levée en utilisant une approche infinitésimale du groupe de relativité, via son algèbre de Lie¹⁰. On aboutit alors, comme cas le plus général, au(x) groupe(s) de de Sitter, et aux cas particuliers que constituent ses diverses contractions (au sens de Wigner-Inönü), soit évidemment les groupes de Poincaré et de Galilée, ainsi qu'à des formes dégénérées moins connues quoique non dépourvues d'intérêt comme le groupe dit de Newton (décrivant un univers en expansion mais à faible vitesse), celui de Carroll¹¹ (une limite anti-galiléenne, à la causalité évanescence), et un groupe "statique".

Le plus étrange peut-être, quant à cette reformulation des fondements du cadre spatio-temporel de la physique actuelle, est son ancienneté, et le désintérêt dont elle a été victime. Car peu d'années déjà après le geste fondateur d'Einstein, les critiques que nous venons de rappeler furent émises, et des constructions alternatives virent le jour, qui, à chaque fois, tombèrent dans l'oubli, et firent l'objet de redécouvertes indépendantes. C'est d'ailleurs après une telle redécouverte que je me suis intéressé à l'archéologie de cette démarche, et que, suite aux recherches de Jean-Pierre Lecardonnell, nombre de ces travaux précurseurs ont pu être exhumés¹². En général plus maladroits et moins clairs que les démarches modernes fondées sur une plus grande maîtrise de la théorie des groupes, ils n'en méritent pas moins de retrouver toute leur place dans l'histoire des fondements de la théorie de la relativité, encore certainement incomplète¹³.

Mentionnons encore la possibilité, à l'inverse de la stratégie usuelle, de construire la dynamique (i.e. les notions d'énergie et de quantité de mouvement, et leurs transformations relativistes) avant la cinématique (les notions d'espace et de temps), et de déduire la seconde de la première¹⁴.

La réforme due à Einstein de notre conception de l'espace-temps est souvent dénommée plus spécifiquement "relativité restreinte" pour la distinguer d'une seconde avancée du même Einstein qui développa à partir de 1915 une nouvelle théorie de la gravitation sous le nom encore plus mal venu de "relativité générale". Ce terme fait référence à la présentation géométrisée choisie par Einstein qui se fonde sur l'équivalence, quant à l'écriture des équations de la théorie, de tous les référentiels, et aboutit à décrire les effets de gravitation comme dus à une courbure de l'espace. Mais le principe d'invariance est ici essentiellement formel, et la même théorie est susceptible d'interprétations physiques fort différentes, en termes (plus conventionnels) de champ gravitationnel plutôt que de courbure de l'espace¹⁵.

Moralité : les changements de référentiels ne sont pas moins intéressants dans l'espace-temps des concepts que dans celui des évènements.

¹ Voir J.-M. Lévy-Leblond, « Un savoir sans mémoire », in *La pierre de touche (la science à l'épreuve...)*, Gallimard, 1996.

² Pour le cas de la théorie quantique, voir J.-M. Lévy-Leblond, « Quantum Words for a Quantum World », in D. Greenberg & al. (eds), *Epistemological and Experimental Perspectives on Quantum Physics*, 75-87, Kluwer (1999).

³ G. Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Seuil, 1992.

⁴ J.-M. Lévy-Leblond, « La relativité aujourd'hui », *La Recherche* **96**, 23 (janvier 1979) & **316**, 83 (janvier 1999).

⁵ L. Feuer, *Einstein et le conflit des générations*, Complexe, 1979.

⁶ J.-M. Lévy-Leblond, « L'idée de relativité », *Sciences et Avenir*, n° HS **121**, 16 (janvier 2000)

⁷ Indiquons au passage que l'invariance galiléenne, pour n'être qu'une forme dégénérée de l'invariance einsteinienne, n'en recèle pas moins bien des richesses conceptuelles spécifiques, et trouve toujours des applications fécondes.

Voir, pour une revue, J.-M. Lévy-Leblond, « Galilei Group and Galilean Invariance », in *Group Theory and its Applications*, E. Loeb ed., Academic Press (N.Y., 1971).

Et pour des développements particuliers : J.-M. Lévy-Leblond, « Galilei Group and Nonrelativistic Quantum Mechanics », *J. Math. Phys.* **4**, 776 (1963) ; « Nonrelativistic Particles and Wave Equations », *Commun. Math. Phys.* **6**, 286 (1967) ; « Galilean Quantum Field Theories and a Ghostless Lee Model », *Commun. Math. Phys.* **4**, 145 (1967) ; [avec M. Le Bellac] « Galilean Electromagnetism », *Nuovo Cimento* **14B**, 217 (1973) ; « Position-dependent Effective Mass and Galilean Invariance », *Phys. Rev. A* **52**, 1845-1849 (1995).

⁸ J.-M. Lévy-Leblond, « One more Derivation of the Lorentz Transformation », *Am. J. Phys.* **44**, 271 (1976) ; [avec J.-P. Provost] « Additivity, Rapidity, Relativity », *Am. J. Phys.* **47**, 1045 (1979). Pour un exposé pédagogique et synthétique, voir J.-M. Lévy-Leblond, *Les relativités*, Cahiers de Fontenay, n°8 (septembre 1977).

⁹ J.-M. Lévy-Leblond, « On the Conceptual Nature of the Physical Constants », *Riv. Nuovo Cimento* **7**, 187 (1977).

¹⁰ H. Bacry & J.-M. Lévy-Leblond, « Possible Kinematics », *J. Math. Phys.* **9**, 1605 (1968).

¹¹ J.-M. Lévy-Leblond, « Une nouvelle limite non-relativiste du groupe de Poincaré », *Ann. Inst. Henri Poincaré* **3**, 1 (1965).

¹² J.-P. Lecardonnell, « Variations sur le principe de relativité », Thèse de Troisième Cycle, Université Paris VI (Pierre et Marie Curie), 1979 ; « Un autre point de vue pour présenter la transformation de Lorentz », *Bull. U. Phys.* **615**, 1171 (1979).

¹³ Citons par exemple (cf. réf. précédente pour une liste plus complète, mais certainement pas exhaustive), en nous limitant à la première moitié du vingtième siècle :

W. V. Ignatowsky, *Archiv der Math. und Phys.* III, **17**, 1 (1910) & **18**, 17 (1911) ; *Phys. Z.* **11**, 972 (1910), & **12**, 776 & 779 (1911)

P. Frank & H. Rothe, *Ann. Phys.* **34**, 825 (1911), & *Phys. Z.* **13**, 750 (1912)

A. C. van Rijn van Alkemade, *Ann. Phys.* **38**, 1033 (1912)

E. Hahn, *Archiv Math. Phys.* III, **21**, 1 (1913)

L. A. Pars, *Phil. Mag.* **42**, 249 (1921)

E. Esclangon, *C. R. Acad. Sci.* **202**, 1492 (1936)

E. Le Roy, *C. R. Acad. Sci.* **202**, 794 (1936)

V. Lalan, *C. R. Acad. Sci.* **203**, 1491 (1936), & *Bull. Sci. Math. France* **65**, 83 (1937).

¹⁴ A. Davidon, *Found. Phys.* **5**, 525 (1976)

J.-M. Lévy-Leblond, « What is so Special about Relativity ? », in *Group Theoretical Methods in Physics*, A. Janner & al. eds, Lecture Notes in Physics n°50, Springer-Verlag (1976)

C. Comte, *Eur. J. Phys.* **7**, 225 (1986)

¹⁵ Ici encore, il existe une littérature ancienne, abondante mais assez largement méconnue :

S. N. Gupta, *Phys. Rev.* **96**, 1683 (1954), *Rev. Mod. Phys.* **29**, 334 (1957)

W. Thirring, *Ann. of Phys.* **16**, 96 (1961)

R. U. Sexl, *Fortschr. Phys.* **15**, 269 (1967)

S. Deser, *Gen. Rel. Grav.* **1**, 9 (1970)

C. W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler, *Gravitation* (1973), p. 424

Y. Avishai & H. Ekstein, *Comm. Math. Phys.* **37**, 193 (1974).