

Réflexions sur le principe de relativité

Auteur : Serge Cabala

Site internet : <http://www.ondes-relativite.info>

Avant d'aborder ce principe en physique, essayons de passer en revue les courants philosophiques qui conduisirent à cette conception et qui tous sont voisins du relativisme. Par ordre chronologique, nous avons :

L'empirisme ; début du XIX^e . Toutes nos connaissances sont les acquisitions de l'expérience. (Mill Hume)

Le sensualisme ; 1803 . Toutes nos connaissances viennent de nos sensations. (Condillac pour qui le bien est ce qui est beau).

Le positivisme ; 1834 . Auguste Comte (1898-1857) . La physique positiviste ne se réclame que de la seule connaissance des faits, de l'expérience scientifique. La physique positiviste ne décrit que des RELATIONS entre les faits observés et refuse toute considération qui n'est pas (directement) observable.

Le positivisme consiste à renoncer à chercher les causes profondes et l'essence des choses et se contente de découvrir les lois effectives qui régissent les faits par l'observation et le raisonnement.

Tout est relatif et cela seul est absolu, est un mot d'Auguste Comte. Comte refuse toute considération métaphysique.

Comte refuse tous les fluides hypothétiques, (éthers, fluide calorique, fluide électrique dans les fils, fluide nerveux, fluide magnétique, etc.). Comte considère la théorie atomique de Dalton comme peu positive, il lui préfère la théorie des équivalents, ou nombres proportionnels de Wollaston.

Il regrette que l'explication des interférences lumineuses repose sur des conceptions chimériques.

Il classe la physique en domaines qui vont du plus positif au moins positif selon ses critères. Ces domaines sont : Barologie ; Thermologie ; acoustique ; optique ; et électrologie .

La chimie et la biologie sont encore moins positives que la physique.

Les travaux de Fourier sur la chaleur, rendent , pour Comte, très positive cette branche de la physique.

Les divers fluides qui entrent alors dans les explications de l'électrologie, la rendent peu positive.

Comte écrit :

« Descartes, Huygens, Newton ont été porté par le vieil esprit métaphysique à créer une hypothèse sur la nature de la lumière .»

Sur l'éther et la lumière : « L'histoire de l'optique montre que ces secours illusoires n'ont exercés aucune influence sur les progrès de la théorie de la lumière. »

« Il faut que l'esprit humain renonce à la poursuite d'une vaine unité scientifique, et reconnaisse que les catégories distinctes de phénomène hétérogènes sont plus nombreux que ne suppose une systématisation énoncée. »

Sur l'électrologie : « Dans aucune autre partie de la physique l'influence des hypothèses arbitraires n'est aussi étendue. Les physiciens les moins philosophes, doivent reconnaître la stérilité de ces hypothèses illusoires... Les uns, en effet l'on fondée sur des fluides imaginaires en transportant à l'action mutuelle de leurs molécules les lois de la mécanique. De tels travaux sont frappés d'inanité, comme le principe qui leur sert de base. »

Sur la chimie : « La chimie est à certains égards essentiellement métaphysique...
La doctrine des affinités jusqu'à présent classique est d'une nature encore plus ontologique que celle des fluides et des éthers imaginaires. »

Sur la thermologie : « Les travaux de Fourier tendent à débarrasser la thermologie de tous les fluides et éthers imaginaires. »

Le pragmatisme ; 1878 . Un phénomène n'est que la somme de ses conséquences pratiques. William JAMES.

L'agnosticisme ; 1884 . Tout ce qui est au-delà du donné expérimental est inconnaissable.
Tout ce qui est métaphysique est inconnaissable.

L'empiriocriticisme ; 1897 . Refus de la dualité et de l'opposition du psychique (subjectif) et du physique (objectif). Ses partisans sont Mach ; Ostwald ; Duhem.

Du fait de la très grande importance des écrits de Mach, Ostwald, Duhem, qui sont des textes fondateurs du principe de relativité, je reproduis ici des extraits qui se trouvent déjà dans la partie consacrée à l'histoire. Si vous les connaissez, vous pouvez vous rendre directement à la page 8.

Voici quelques textes de Mach, préludes au principe de relativité.

Dans son livre **-La Mécanique-** de 1904, on lit :

"Dans la théorie de l'électricité, toute hypothèse de fluide ou de milieu se trouve inutile et doit disparaître, car toutes les circonstances électriques sont données par les valeurs du potentiel V et des constantes diélectriques. ... En procédant ainsi dans toutes les branches de la physique, on se limite à l'expression quantitativement concevable des faits, et toutes les notions inutiles et oiseuses s'éliminent aussitôt avec tous les *prétendus* problèmes que l'on y rattache."

"La théorie atomique a, dans la science physique, une fonction analogue à celle de certaines représentations mathématiques auxiliaires: elle est un modèle mathématique pour la description des faits."

"L'opinion qui fait de la mécanique la base fondamentale de toutes les autres branches de la physique, et suivant laquelle tous les phénomènes physique doivent recevoir une explication *mécanique*, est selon nous un préjugé."

"La conception mécanique de la nature nous apparaît comme une hypothèse fort explicable historiquement, excusable et peut-être fort utile pour un temps, mais somme toute artificielle."

"Nous avons donc simplement à découvrir les dépendances réelles des mouvements des masses, des variations de la température, des variations de valeur de la fonction potentielle, des variations chimiques, **sans nous imaginer rien d'autre sous ces éléments**, qui sont les caractéristiques physiques directement ou indirectement données par l'observation."

"Dans la recherche on procède par le **principe de continuité**, car c'est uniquement celui-ci qui peut fournir une conception utile et économique de l'expérience."

"L'idée d'une économie de la pensée se développa en moi par mes expériences professorales dans la pratique de l'enseignement. Je la possédais déjà lorsqu'en 1861 je commençai mes leçons comme privat docent, et je croyais être le seul à l'avoir, ce que l'on voudra bien trouver pardonnable."

"La science elle-même peut donc être considérée comme un problème de minimum, qui consiste à exposer les faits aussi parfaitement que possible avec *la moindre dépense intellectuelle*."

Mach s'oppose au temps absolu de Newton.

"Parler d'un <<temps absolu>>, indépendant de toute variation, est aussi dépourvu de sens. Ce temps absolu ne peut être mesuré par aucun mouvement; il n'a donc aucune valeur, ni pratique, ni scientifique. Personne ne peut dire qu'il sache rien de ce temps absolu: **c'est une oiseuse entité <<métaphysique.>>**"

"Les obscurités métaphysiques s'évanouissent dès que l'on s'est parfaitement rendu compte qu'il s'agit simplement d'établir la *dépendance mutuelle* des phénomènes ainsi que je l'ai fait ressortir déjà en 1865, 1867 et 1887." (Voir page 220 de son livre pour les références exactes)

Il s'oppose de même très fortement à l'espace absolu de Newton.

"**Personne ne peut rien dire de l'espace absolu et du mouvement absolu**, qui sont des notions purement abstraites, qui ne peuvent en rien être le résultat de l'expérience. Nous avons montré en détail que tous les principes fondamentaux de la mécanique proviennent d'expériences sur les positions et les mouvements relatifs des corps. Dans les domaines où l'on reconnaît aujourd'hui leur validité, ils n'ont pas été acceptés sans preuves et ne pouvaient l'être. **Nul n'est autorisé à étendre ces principes hors des limites de notre expérience**. Bien plus cette extension n'aurait **aucun sens** car personne ne saurait en faire usage."

"Abstraction faite de ce milieu inconnu de l'espace (il s'agit de l'éther que Mach ne prononce pas), qui ne doit pas être considéré, on trouve que les mouvements dans le système du monde sont relatifs et les mêmes, que l'on adopte le système de Ptolémée ou celui de Copernic. Ces deux conceptions sont *également justes*; la seconde n'est que plus simple et plus pratique."

"D'après moi il n'existe somme toute qu'un mouvement relatif et je n'aperçois à cet égard *aucune* distinction entre la rotation et la translation. Une rotation relativement aux *étoiles fixes* fait naître dans un corps des forces d'éloignement de l'axe; si la rotation n'est pas relative aux étoiles fixes, ces forces d'éloignement n'existent pas. Je ne m'oppose pas à ce qu'on donne à la première rotation le nom *d'absolue* pourvu que l'on n'oublie pas qu'elle n'est autre qu'une rotation *relative* par rapport aux *étoiles fixes*."

"Je considère donc ces *deux* cas comme n'en formant *qu'un seul* et la distinction qu'en fait Newton comme illusoire."

La relativité du mouvement est déjà défendue par Mach dès 1872. Dans "Histoire et fondement du principe de conservation de l'énergie" on retrouve à peu près le même texte :

"Pour moi il n'existe que des mouvements relatifs..."

"Quand un corps tourne par rapport aux étoiles fixes, des forces centrifuges se produisent; quand il tourne par rapport à quelqu'autre corps et non par rapport aux étoiles fixes, aucune force centrifuge ne se produit. Je ne m'oppose nullement à ce qu'on réserve au premier le terme de rotation, aussi longtemps que l'on se rappellera qu'il ne s'agit de rien d'autre qu'une rotation relative par rapport aux étoiles fixes."

"De tout évidence, cela n'a guère d'importance que nous pensions de la terre qu'elle tourne sur son axe, ou qu'elle est immobile tandis que les étoiles fixes tourneraient autour d'elle."

Voici quelques textes de Duhem.

"Traité d'Energétique" paru en 1911

"La réduction de toutes les propriétés physiques à des combinaisons de figures et de mouvement ou, selon la dénomination en usage, *l'explication mécanique de l'Univers*, **semble aujourd'hui condamnée**. Elle est condamnée parce qu'elle n'a été jusqu'ici qu'un projet, qu'un rêve, et non une réalité. Malgré d'immenses efforts, les physiciens ne sont jamais parvenus à concevoir un agencement de figures géométriques et de mouvement locaux qui, traité selon les règles de la Mécanique rationnelle, donne une représentation satisfaisante d'un ensemble quelque peu étendu de lois physiques. La tentative qui se propose de réduire toute la Physique à la Mécanique rationnelle, tentative qui fut toujours vaine dans le passé, est-elle destinée à réussir un jour? Un prophète seul pourrait répondre affirmativement ou négativement à cette question. Sans préjuger le sens de cette réponse, il paraît plus sage de renoncer, au moins provisoirement, à ces efforts, stériles jusqu'ici, vers l'explication mécanique de l'Univers."

Pour Duhem, tout la physique se trouve incluse dans l'Energétique.

"Le code des lois générales de la Physique est connu aujourd'hui sous deux noms: le nom de *Thermodynamique* et le nom d'*Energétique*."

Sa vision de l'espace et du temps est celle de l'école relativistes qui existait déjà au dix-neuvième siècle.

"*Les notions de temps relatif à une certaine horloge et de mouvement relatif à un certain trièdre de référence suffisent à constituer la Cinématique.*"

La continuité de la matière est une base fondamentale de ce mouvement relativiste-énergétique, et Pierre Duhem en rappelle son principe:

"Dans ce qui va suivre, nous représenterons un corps comme un espace linéairement connexe, rempli *d'une manière continue*, par une certaine *matière*."

"Nous ne discuterons pas si les corps sont réellement continus ou s'ils sont formés de parties disjointes séparés par le vide; si ces parties disjointes ont des dimensions finies, bien que très petites, ou bien si ce sont de simples points. Toutes ces questions au sujet de la constitution réelle des corps ne sont pas objet de Physique, mais de **Métaphysique**; elles ont donné et donnent encore lieu à de vifs débats entre les diverses Ecoles Philosophiques.

La physique cherche seulement à construire, au moyen de notions empruntées aux mathématiques, un système logique qui fournisse une **image approchée** des lois relatives aux corps."

"On évite toutes ces difficultés en figurant d'emblée **la matière comme continue**. Ce mode de représentation conduisant, dans toutes les parties de la Physique, à des théories plus simples, plus claires, plus élégantes que les représentations atomiques et moléculaires, nous l'adopterons de préférence à ces dernières, sans prétendre rien affirmer par là touchant la constitution réelle des corps."

Duhem, après avoir présenté sa conception des combinaisons chimiques comme un mélange particulier de corps continus, évoque l'explication atomique de ces combinaisons, puis il dit: "En réalité, les choses se passent-elles conformément à cette dernière théorie, ce qui est l'opinion des Ecoles atomistique et cartésienne, ou bien conformément à la première, ce qui est la doctrine péripatéticienne? Cette question ressortit à la **Métaphysique** et non à la Physique. Pour constituer une représentation symbolique des lois naturelles, ce qui est son objet propre, la Physique théorique est libre d'adopter l'un ou l'autre mode de figuration du mélange et de la combinaison; nous choisirons le premier parce qu'en toute circonstance il donne lieu à des raisonnements plus simples et à des calculs plus élégants." (Le premier mode est celui de la physique péripatéticienne.)

Pour Duhem, la Physique ne peut être qu'une description approchée de notre Univers.

"Contrairement à cette opinion erronée, nous savons que la théorie physique est une construction idéale, dont les éléments n'ont aucune relation de nature avec les objets concrets; elle est destinée à donner une **image approchée de la réalité**, et, pour cela, il suffit que chacun des éléments idéaux qui la composent corresponde d'une manière approchée à un objet concret."

"Le physicien ne peut donc, entre les corollaires de la théorie et les lois expérimentales, rechercher autre chose qu'une **concordance approchée et partielle**."

Voici comment Duhem conçoit la Thermodynamique, ou une théorie physique quelconque.

"Les principes de la Thermodynamique sont de purs postulats; nous pouvons les énoncer comme il nous plaît, pourvu que l'énoncé d'aucun d'entre eux ne soit contradictoire en soi et que les énoncés des divers principes ne se contredisent pas les uns les autres."

"Au cours de son exposé, une théorie physique est libre de choisir la voie qui lui plaît, pourvu qu'elle évite toute contradiction logique; en particulier elle n'a à tenir aucun compte des faits d'expérience."

Je poursuis avec **Duhem** et son livre "**La Théorie Physique, son Objet, sa Structure**" édition 1914 (la première édition date de 1906)

Dans la première partie de son livre, Duhem critique fortement l'école anglaise. Au ch.IV §V on lit : "Voici un livre destiné à exposer les théories modernes de l'électricité, à exposer une théorie nouvelle; il n'y est question que de cordes qui se meuvent sur des poulies, qui s'enroulent sur des tambours, qui traversent des perles, qui portent des poids; de tubes qui pompent de l'eau, d'autres qui s'enflent et se contractent; de roues dentées qui engrènent les unes sur les autres, qui entraînent des crémaillères; nous pensions entrer dans la demeure paisible et soigneusement ordonnée de la raison déductive; nous nous trouvons dans une usine."

(Le livre critiqué est d'Olivier Lodge)

Au ch.IV §IX Duhem évoque certains travaux de Lorentz et de J.J. Thomson, mais sa conclusion est assez négative car il dit : "Mais ne nous attardons pas à ces arguties. Admettons sans détour que l'emploi de modèles mécaniques a pu guider certains physiciens dans la voie de l'invention et qu'elle pourra conduire à d'autres trouvailles. Du moins est-il certain qu'elle n'a point apporté aux progrès de la Physique cette riche contribution qu'on nous vantait; la part de butin qu'elle a versée à la masse de nos connaissances semble bien maigre lorsqu'on la compare aux opulentes conquêtes des théories abstraites."

Le §II du ch.V est intitulé: "Qu'une loi de physique n'est, à proprement parler, ni vraie ni fausse, mais approchée."

La conclusion de ce paragraphe est : "Ainsi, **toute** loi physique est une loi approchée; par conséquent, pour le strict logicien, elle ne peut être ni vraie ni fausse; ..."

Le relativisme de Duhem se confirme au §III suivant, nommé : "Que **toute loi** de Physique est provisoire et **relative** parce qu'elle est approchée."

Ce paragraphe se termine par : "L'appréciation de sa valeur {valeur de la loi} varie d'un physicien à l'autre, au gré des moyens d'observation dont ils disposent et de l'exactitude que réclament leurs recherches; elle est essentiellement **relative**."

Cette édition de 1914 contient des chapitres supplémentaires intéressants, dont un est intitulé : "**Physique de croyant**"

Le §IV de ce chapitre est dénommé : "**Notre système fait évanouir les objections prétendues de la science physique contre la métaphysique spiritualiste et contre la foi catholique.**"

Voici des extraits du discours de **Willem Ostwald** sur la banqueroute du matérialisme scientifique, discours fait en 1895 au congrès des naturalistes allemands.

Il y exprime ses idées de façon assez brutale.

"De tout temps, on s'est plaint d'être si peu d'accord sur les questions fondamentales qui intéressent le plus l'humanité. C'est de nos jours seulement que ces plaintes se sont tues; en fait, chose rare à toute autre époque, il règne aujourd'hui, à part quelques divergences encore, un accord presque complet en ce qui concerne la conception du monde extérieur. Notre siècle est le siècle du naturalisme. Interrogez le premier venu, pénétré des idées naturalistes, depuis le mathématicien jusqu'au médecin praticien; demandez lui son avis sur la constitution intime du monde. La réponse sera invariablement la même : <<Toutes choses sont formées d'atomes en mouvement; ces atomes et les forces qui agissent entre eux sont les dernières réalités dont se composent les phénomènes particuliers.>> Partout on répète, en manière d'axiome, que seule la mécanique des atomes peut donner le clef du monde physique. Matière et mouvement, tels sont les deux concepts auxquels on ramène en dernière analyse les phénomènes naturels les plus complexes. A cette théorie on peut donner le nom de *matérialisme physique*."

"Je veux exprimer ici ma conviction que cette manière de voir, malgré tout son crédit, est insoutenable; que cette théorie mécanique n'a pas atteint son but, car elle se trouve en contradiction avec des vérités tout à fait hors de doute et universellement acceptées. La conclusion s'impose : il faut l'abandonner et la remplacer, autant que faire se peut, par une autre meilleure. On se demandera naturellement: En existe-t-il une meilleure? A cette question je crois pouvoir répondre par l'affirmative." (C'est l'énergétique.)

"Pourtant la théorie des ondulations était aussi comptée; à notre époque, cette théorie a été enterrée sans bruit, pour faire place à la théorie électromagnétique. **Faisons l'autopsie de son cadavre: la cause est évidente, elle a péri par ses parties mécaniques...**"

Les extraits suivants du livre d'**Ostwald** : "**L'Energie**",(1907) paru en 1911 en français dévoilent certains aspects curieux de sa pensée.

Dans tout ce livre, Ostwald s'oppose aux atomes et aux conceptions mécanistes conformément à son école, avec en plus certaines applications surprenantes de l'énergétique.

Ostwald attend vraiment tout de l'énergie et de l'énergétique, comme on peut le lire dans l'introduction de son livre : "L'énergie est donc un élément essentiel de toutes les choses réelles, c'est à dire concrètes; aussi peut-on dire que *c'est dans l'énergie que s'incarne le réel*."

"M'adressant aux personnes cultivées, je chercherai à leur montrer, en empruntant constamment des exemples à l'expérience journalière, comment l'énergétique permet de ramener à un point de vue unique les manifestations les plus diverses du savoir humain, comment elle donne le moyen non seulement de comprendre le passé, et de juger du présent, **mais encore de déterminer l'avenir**."

Pour Ostwald, l'esprit est une forme particulière d'énergie. Sa conception est assez déroutante.

§36 "On verra plus tard que l'on ne doit pas s'arrêter à cette conception comme quelque chose de définitif, et que le dualisme matière-énergie lui même peut être supprimé, attendu que la notion de matière est une notion subordonnée, et une notion qui n'est même pas particulièrement heureuse. Bien entendu, le dualisme esprit-matière disparaît du même coup, et la question se pose de savoir quelle est la relation de l'énergie avec l'esprit. Eh bien -et c'est là le progrès le plus considérable qui ait été réalisé dans cet ordre d'idées- au regard de la science ces deux entités sont de même espèce, et **la notion d'esprit se fond dans celle d'énergie**."

Dans ce qui suit comme dans ce qui précède, on se rend compte que l'équivalence matière énergie est une notion fortement encrée chez Ostwald..

§83 "Dans la plupart des cas, les choses ont pris à nos yeux un aspect différent de celui auquel nous avait accoutumés le matérialisme scientifique, car, à la place de la réalité (très douteuse) de la matière, nous est apparue celle de l'énergie."

Ostwald exprime ci-dessous sa confiance en l'énergétique, et sa défiance vis à vis des hypothèses mécanistes.

"Tout ce qui pourra arriver aux lois énergétiques, c'est d'être élargies ou précisées; l'édifice qu'elles forment sera peut-être embelli; jamais il ne sera démoli ou reconstruit. Ce qui a été à mainte reprise démoli et reconstruit -et il était inévitable qu'il en fût ainsi- ce sont les hypothèses mécanistes."

Ostwald cherche à pénétrer les secrets de la vie par l'énergétique.

§84 "Aussi allons nous rechercher si l'on peut utiliser les notions énergétiques pour découvrir quelle est l'essence de la vie."

§93 "...; la question que l'on a à résoudre est celle de savoir *dans quelle relation la notion d'énergie, qui est beaucoup plus large que celle de matière, se trouve avec la notion d'esprit.*"

"Je crois pouvoir présenter les choses ainsi : *les phénomènes psychologiques peuvent être conçus comme des phénomènes énergétiques et interprétés comme tels aussi bien que tous les autres phénomènes.*"

§94 "..., nous dirons que nous avons affaire ici à de l'*énergie nerveuse, ...*".

Cette partie de la conclusion d'Ostwald permet de se rendre compte de l'attente démesurée qu'il a de l'énergétique :

§107 "On voit donc que l'énergétique permet d'explorer avec succès **tous les domaines** de la civilisation, et que non seulement elle fait comprendre son passé dans ses grandes lignes, mais encore elle indique nettement où doivent tendre ses efforts."

Comme pour Duhem, il semble que des préoccupations d'ordre spirituelle lui fassent préférer le relativisme (de Comte) au mécanisme (anglais).

Dans ce livre qui fut écrit en 1907, Ostwald ne cite ni Lorentz ni Einstein.

On peut tout de même se demander comment un homme aussi rationnel qu'Ostwald a pu avoir de si curieuses idées? Je crois que la réponse se trouve dans l'introduction de son livre : "Il y a quelques années, un homme bienfaisant, dont l'esprit a autant d'étendue que de profondeur, donna les sommes nécessaires pour construire et installer magnifiquement un institut destiné à des recherches qui s'imposent aujourd'hui avec grande force, à des recherches relatives aux phénomènes *sociaux*; or, en même temps, il fit un don plus précieux encore, celui d'une idée, dont l'étude approfondie constituera le fond intellectuel de cet institut jusque dans le lointain avenir. Cette idée, c'est d'**appliquer la science de l'énergie aux phénomènes sociaux**. Il pense avec raison que ce n'est qu'au moyen de l'énergétique que l'on pourra parvenir à une conception et à un classement scientifique de ces phénomènes d'une complication si grande. On aurait pu croire que cette idée exciterait immédiatement et partout l'attente à laquelle elle a droit; mais, tout au contraire, elle semble avoir été à peine comprise jusqu'à présent, et l'on ne trouve guère de marques de son influence en dehors du cercle des collaborateurs de E. Solvay."

Le bienfaiteur dont il s'agit est Ernest Solvay, de Bruxelles, patron et fondateur des usines Solvay. Solvay organisa en 1911 une conférence scientifique internationale (la conférence Solvay) à laquelle participèrent Lorentz, Poincaré, Langevin, Rutherford, Marie Curie, Einstein etc... Cette conférence fut immortalisée par une photo maintenant célèbre.

Le relativisme ; 1898. Caractère que présente la connaissance de ne pouvoir saisir que des relations et non la réalité même, ou encore de dépendre de la structure de l'esprit humain. On constate que toutes les doctrines précédentes ne sont que des aspects plus ou moins détaillés du relativisme.

Citons la dernière tendance :

Le logico-positivisme ; vers 1960. Théorie d'une science unifiée par les structures mathématiques . Carnap, Tarski, Morris.

Le principe de relativité en physique.

Voilà comment Einstein conçoit en 1905 le principe de relativité : « Pour tous les systèmes de coordonnées pour lesquels les équations mécaniques restent valables, les lois électrodynamiques et optiques gardent également leurs valeurs; c'est ce qui a été déjà démontré pour les grandeurs du premier ordre.

Nous voulons élever cette conjecture (dont le contenu sera appelé dans ce qui suit <<principe de relativité>>) au rang d'une hypothèse et introduire en outre la supposition, qui n'est qu'en apparence incompatible avec ce principe, que la lumière se propage toujours dans le vide avec une certaine vitesse c indépendante de l'état de mouvement de la source lumineuse. »

Voilà ce qui est dit dans Landau et Lifchitz : THEORIE DU CHAMP paru aux éditions de Moscou en 1966.

« L'expérience montre l'existence d'un principe dit de relativité. Ce principe stipule que toutes **les lois de la nature sont identiques dans tous les référentiels d'inertie**. En d'autres termes, les équations traduisant les lois de la nature sont invariantes par rapport aux transformations des coordonnées et du temps, lorsqu'on passe d'un référentiel d'inertie à un autre. Cela signifie que l'équation décrivant une certaine loi de la nature, étant exprimée au moyen des coordonnées et du temps, a la même forme quelque soit le référentiel d'inertie choisi. »

Dans tous les autres écrits, on lit à peu près la même chose, et parfois, l'expression « lois de la nature » est remplacée par « grandes lois de la nature », car certaines lois (les petites !) ne sont pas préservées. Par exemple l'immobilité d'un objet est rarement préservée par changement de référentiel. (L'équation de Schrödinger n'est pas préservée par les transformations de Lorentz.)

(La covariance sera abordée plus bas.)

Une première difficulté, c'est de savoir ce que sont exactement les référentiels d'inertie, mais supposons la question résolue. Que signifie alors : toutes les grandes lois de la nature sont identiques dans tous les référentiels d'inertie ? Et comment s'exprime une grande loi de la nature ? Et quelles grandes lois connaissons-nous ?

Essayons de préciser le principe de relativité donné par Landau et Lifchitz.

Soient R et R' deux référentiels d'inertie, notons (x,y,z,t) et (x',y',z',t') les coordonnées perçues respectivement dans R et R' d'un même événement.

Les seules grandes lois assez bien connues sont celles de l'électromagnétisme (dans le vide), qui dans le repère R fait intervenir dix grandeurs (3 pour le champ électrique, 3 pour le champ magnétique, 3 pour la densité de courant et 1 pour la densité de charge) notées $g_i(x,y,z,t)$, i de 1 à 10, liées entre elles par les équations de Maxwell. Dans ce cas le principe de relativité s'interprète en affirmant que les $g'_i(x',y',z',t')$, qui sont les grandeurs g_i perçues dans R' , vérifient aussi les équations de Maxwell.

Ces considérations conduisent à énoncer le principe de relativité ainsi : chaque grande loi de la nature s'exprime dans le repère R par une famille de relations au sein d'une famille de grandeurs $g_i(x,y,z,t)$, i de 1 à n , et si $g'_i(x',y',z',t')$ sont les valeurs des grandeurs perçues dans R' , alors les $g'_i(x',y',z',t')$ vérifient la même famille de relations. Est ce que toutes les grandes lois de la nature s'expriment de cette façon ? Et comment savoir qu'une loi est grande ?

On remarque que le principe de relativité ne fait pas directement intervenir la vitesse de la lumière ou les transformations de Lorentz. La constance de la vitesse de la lumière est une supposition supplémentaire, comme le dit Einstein dans la citation plus haut.

On constate de plus que le principe de relativité ne précise pas comment l'on passe de R à R' , ni comment l'on construit R . On se contente de parler de référentiels d'inertie.

Qu'est donc un référentiel d'inertie, et sur quelles conditions sont construites les transformations de Lorentz ?

Voici la réponse.

Un référentiel d'inertie est celui dans lequel les équations de Maxwell sont rigoureusement exactes, car elles sont estimées comme de grandes lois de la nature. Le référentiel rapporté aux étoiles fixe, celui de Newton, est le premier référentiel d'inertie, R , que l'on se donne, et l'on n'en connaît pas d'autre au départ (à des rotations et translations près).

On se donne donc un premier référentiel R , puis on construit un autre référentiel R' qui vérifie les propriétés suivantes.

(Le fait que R soit d'inertie n'intervient pas dans la construction des formules de Lorentz, lorsqu'on la base sur les conditions que j'énumère ci-dessous).

Première condition : Les formules de passage de R à R' sont linéaires.

Cette première clause ne figure pas dans l'énoncé du principe de relativité, car les référentiels d'inertie n'y sont pas nettement définis, et sans autre précision, selon l'usage courant, les transformations permettant de passer d'un référentiel d'inertie à l'autre, sont celles de Galilée. Et comme par la suite les référentiels d'inertie sont ceux justement obtenus à partir de R par les transformations de Lorentz, il s'ensuit qu'il est impossible de les définir clairement avant la construction de ces transformations.

Seconde condition : Par rapport à R , l'origine O' de R' se déplace à vitesse \vec{v} constante.

Troisième condition : Par rapport à R' , la vitesse de l'origine O de R est $-\vec{v}$.

Quatrième condition : Le déterminant de la matrice de passage de R à R' vaut 1.

Cinquième condition : Un mobile de vitesse c dans R , (c constante et $-c < \|\vec{v}\| < c$), a aussi c pour vitesse c dans R' .

Sixième condition : les temps dans R' vont en croissant comme dans R .

Aucune de ces clauses ne figure dans les différents énoncés initiaux du principe de relativité.

Remarque : R' peut aussi se construire à partir de pures considérations électromagnétiques.

Après la construction des transformations de Lorentz, le principe de relativité est réécrit, son expression moderne est : **Dans la nature, les systèmes fondamentaux de grandeurs** (mis sous forme de tenseurs appropriés) **sont covariants par les transformations de Lorentz, et les nouvelles grandeurs restent liées par les mêmes relations fondamentales.** Ce qui se résume en : **Les grandes lois de la nature sont covariantes par les transformations de Lorentz.** (Les grands tenseurs sont : électromagnétique, intensité densité de courant, impulsion énergie)

Cette formulation montre que ce qui est primordial, ce sont les transformations de Lorentz, et une loi n'est fondamentale que si elle est covariante par ces transformations.

Le principe de relativité n'est plus que le nom que l'on donne au critère qui permet de classer les lois en fondamentales et secondaires.

Même si l'on refuse cette expression moderne, la base reste la transformation de Lorentz, qui définit ce que sont tous les autres systèmes d'inertie à partir d'un premier système donné, et une loi de la nature n'est fondamentale que si elle a même expression dans tous les systèmes d'inertie. **De nouveau le principe de relativité n'est que le nom d'un critère de classement de lois.**

Peut-on comparer ce critère de relativité aux transformations de Lorentz par une équivalence ou une implication? Non car ce sont deux choses de nature très différente. Les exemples suivants feront mieux voir.

Si je dis que les grandes lois de la géométrie plane sont invariables par les changements de repère orthonormé, affirmer que ce critère de classement des lois équivaut au changement de repère orthonormé n'a pas sens.

Si je dis : par principe les grandes couleurs restent inchangées par tout lavage, déclarer que ce principe équivaut au lavage est du pur surréalisme. Si je dis : par principe un bon nombre est celui qui reste premier quand on lui ajoute 2, dire que ce principe équivaut à ajouter 2 paraît insensé.

Souvent le critère de relativité est utilisé à l'envers. On suppose que des grandeurs vues dans différents repères d'inertie, R, R', R'' etc.. obéissent aux mêmes lois pour en tirer une conséquence parfois contraire à ce qui est obtenu en appliquant correctement les transformations de Lorentz aux grandeurs considérées, d'où les paradoxes.

Dans le cas du paradoxe des jumeaux, on prétend que le résultat du calcul n'est pas conforme au principe de relativité. L'erreur vient de ce que : 1° On applique à priori ce principe à une situation à laquelle il n'est pas destiné. 2° On préjuge du résultat en transformant le critère de relativité en une sorte d'égalité des repères.

Les tenseurs fondamentaux de la relativité restreinte.

La matrice de Lorentz est $L = \begin{pmatrix} a_1^1 = \frac{1}{b} & a_2^1 = 0 & a_3^1 = 0 & a_4^1 = \frac{v}{b} \\ a_1^2 = 0 & a_2^2 = 1 & a_3^2 = 0 & a_4^2 = 0 \\ a_1^3 = 0 & a_2^3 = 0 & a_3^3 = 1 & a_4^3 = 0 \\ a_1^4 = \frac{v}{bc^2} & a_2^4 = 0 & a_3^4 = 0 & a_4^4 = \frac{1}{b} \end{pmatrix}$, avec $b = \sqrt{1 - v^2/c^2}$, que l'on

peut multiplier à droite et à gauche par des matrices de la forme $\begin{pmatrix} & & & 0 \\ & M & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, M étant une matrice 3x3

de changement de repère orthonormé. Ce qui donne une matrice $N = (n_j^i)$, i, j de 1 à 4, qui est la matrice de

passage du repère R « immobile » au repère R' à vitesse v . On a : $\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = N^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}$

Le tenseur impulsion énergie est : $\left(F_1 = \frac{m_0 w_x}{b_w} \quad F_2 = \frac{m_0 w_y}{b_w} \quad F_3 = \frac{m_0 w_z}{b_w} \quad F_4 = -\frac{m_0 c^2}{b_w} \right)$ avec

$$b_w = \sqrt{1 - w^2/c^2}.$$

Le tenseur densité de courant, densité de charge est : $\left(F_1 = \frac{i_x}{c^2} \quad F_2 = \frac{i_y}{c^2} \quad F_3 = \frac{i_z}{c^2} \quad F_4 = -\rho \right)$

Le tenseur électromagnétique est : $\begin{pmatrix} F_{1,1} = 0 & F_{2,1} = -B_z & F_{3,1} = B_y & F_{4,1} = -E_x \\ F_{1,2} = B_z & F_{2,2} = 0 & F_{3,2} = -B_x & F_{4,2} = -E_y \\ F_{1,3} = -B_y & F_{2,3} = B_x & F_{3,3} = 0 & F_{4,3} = -E_z \\ F_{1,4} = E_x & F_{2,4} = E_y & F_{3,4} = E_z & F_{4,4} = 0 \end{pmatrix}$

La valeur des tenseurs perçus dans le repère R' est : $F'_j = \sum_{i=1}^{i=4} n_j^i F_i$; $F'_{p,q} = \sum_{i=1}^{i=4} \sum_{j=1}^{j=4} n_p^i n_q^j F_{i,j}$.

Les tenseurs sont covariants. Pour un tenseur une fois covariant tel l'impulsion énergie, on remarque que l'on a : $(F'_1 \quad F'_2 \quad F'_3 \quad F'_4) = N(F_1 \quad F_2 \quad F_3 \quad F_4)$.

Le tenseur deux fois covariant,, g_{ji} défini par : $g_{1,1} = g_{2,2} = g_{3,3} = 1$; $g_{4,4} = -c^2$ et $g_{ji} = 0$ si $i \neq j$, est invariant par tout changement de repère de type N . C'est le tenseur métrique des transformations de Lorentz.

Si on prend maintenant une matrice 4x4 $N = (n_j^i)$ (quasi-)quelconque de déterminant non nul, qui définit un nouveau repère R' , à partir du repère R dans lequel sont vérifiées les grandes lois de la physique, et si R' est

muni de la métrique définie par $g'_{p,q} = \sum_{i=1}^{i=4} \sum_{j=1}^{j=4} n_p^i n_q^j g_{i,j}$, les tenseurs fondamentaux perçus dans R' sont encore donnés par les transformations covariantes ci-dessus.

(Serge Cabala)