

Le principe de relativité : Ou l'universalité des lois de la physique.

Préambule :

Au cours du 20^e siècle, le principe de relativité a été au cœur des débats scientifiques. Il a conduit à la victoire des relativistes, et ringardisé les sceptiques. Il serait vain de revenir sur la bataille quasi idéologique qui les opposait.

Un siècle après, l'observation de la déviation gravitationnelle de la lumière, et le triomphe de la théorie de la relativité générale, il est essentiel de revenir sur les relations entre les faits, les théories et les principes qu'elles doivent respecter.

Quels enseignements devons-nous tirer de cette période? Dans quel esprit devons nous aborder les défis scientifiques qui se présenteront à nous au cours de ce nouveau siècle ?

Un principe fondamental :

Ce principe a été formalisé pour la première fois par Henri Poincaré dans sa conférence de Saint-Louis en septembre 1904. Je cite sa définition: "*principe de relativité d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement uniforme, de sorte que nous n'avons et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes, oui ou non, emportés dans un pareil mouvement*".

Cette définition correspond au sujet essentiel qui préoccupait les physiciens à cette époque : justifier l'échec des expériences interférométriques de Michelson. Poincaré ne fait qu'affirmer un principe fondamental : les lois de la physique sont universelles et ne dépendent pas du laboratoire dans lequel on les étudie.

Dans cette conférence de Saint Louis, il applique le principe de relativité à l'électromagnétisme. Il prend comme hypothèse qu'il est impossible de mesurer la vitesse absolue de la Terre par des mesures interférométriques. Il formalise alors les invariances reconnues aux lois de la mécanique et les étend à l'électromagnétisme. Cette position n'est pas dogmatique. C'est sur les bases des expériences de Michelson qu'il prend cette position et étudie la faisabilité d'une théorie électromagnétique nouvelle conduisant à la constance de la vitesse de la lumière.

La relativité classique :

La mécanique classique respecte le principe de relativité. Ses lois sont conservées entre repères en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, mais ne sont pas conservées entre repères en rotation, cette dernière propriété ayant été démontrée en 1851 par l'expérience du pendule de Foucault.

L'électromagnétisme ne semblait pas susceptible d'être relativiste dans les mêmes termes que la mécanique pour de nombreuses raisons. La principale était que la propagation de la lumière à la vitesse "c", et les équations de Maxwell, supposaient implicitement l'existence d'un milieu de transmission.

La relativité de la mécanique classique :

Les équations fondamentales de la mécanique sont clairement à l'origine du principe de relativité tel qu'il a été formulé par Poincaré en 1904. Elles sont conservées entre deux repères en translation rectiligne uniforme. La valeur de l'énergie cinétique est alors, en posant $\beta=V/c$:

$$\Delta E = \frac{M}{2} \cdot V^2 = \frac{M \cdot c^2}{2} \cdot \beta^2 = \frac{E_0}{2} \cdot \beta^2$$

En l'absence de rotation, elles sont également conservées entre repères accélérés, sous réserve de tenir compte de l'accélération relative des repères qui est équivalent à un champ de gravitation uniforme (Cette observation conduira plus tard Einstein au principe d'équivalence, puis à la théorie de la relativité générale). La conservation de l'énergie étant bien évidemment assurée même si sa valeur diffère d'un repère à l'autre.

L'électromagnétisme classique :

Les formules de l'électromagnétisme conduisent à des résultats analogues à ceux de la mécanique. Elles permettent de calculer les forces appliquées à une charge électrique par les champs électriques et magnétiques qui l'entourent, ainsi que son énergie cinétique.

L'énergie cinétique d'un champ électromagnétique est toutefois différente de celles d'une masse mécanique. Des raisons théoriques conduisent à admettre que l'énergie d'un champ électrique (par exemple celui d'une charge électrique) d'énergie au repos E_0 et de vitesse V est, en posant $\beta=V/c$:

$$\Delta E = \frac{E_0}{2} \cdot \frac{\beta^2}{1 - \beta^2}$$

Cette formule est analogue à celle de la mécanique classique, mais en diffère par l'introduction du terme $1-\beta^2$.

L'électromagnétisme classique est-il relativiste ?

Ces formules découlant directement des lois de l'électromagnétisme classique sont clairement relativistes en admettant que le temps du repère en mouvement est ralenti dans le rapport γ de la relativité restreinte :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Toutefois, la vitesse de la lumière reste anisotrope. Il suffit alors d'introduire un vecteur vitesse du milieu de propagation (ou anisotropie optique) pour prendre en compte cet effet. N'oublions pas que les équations, établies par Maxwell, justifient l'existence d'ondes électro-magnétiques de vitesse "c", ce qui semble impliquer la présence d'un milieu de propagation : l'Ether. De plus, elles introduisent arbitrairement dans le vide un courant de déplacement dont la signification physique n'a pas été clairement établie.

L'électromagnétisme classique est donc "presque" relativiste.

La relativité restreinte :

Pour respecter la constance de la vitesse de la lumière, la relativité restreinte introduit deux modifications des lois de la physique :

- La contraction de Lorentz qui a pour effet de réduire l'énergie d'une charge électromagnétique mobile dans le rapport γ ,
- Une modification complémentaire de la mécanique.

Ces modifications ne sont justifiées que par la nécessité de rendre la vitesse de la lumière identique dans tous les repères en translation rectiligne uniforme.

Un coup de pouce de la nature :

Michelson avait voulu mesurer la vitesse absolue de la terre. L'échec de son expérience semblait ne pouvoir être expliquée que par l'invariance de la vitesse de la lumière lors d'un changement de repère. Celle-ci ne pouvait être alors qu'une constante universelle.

Pour justifier cette invariance de la vitesse de la lumière, Lorentz avait imaginé une contraction des corps dans le sens du déplacement. Poincaré avait alors explicité les formules de changement de repère correspondantes et montré que ces transformations ont des propriétés remarquables (les mathématiciens disent qu'elles constituent un corps). En abandonnant la notion de temps absolu, ces équations introduisent un effet "stroboscopique" entre deux repères en mouvement relatif.

La contraction de Lorentz, "*ce coup de pouce de la nature*", selon l'expression de Poincaré, reste toutefois justifié par un seul résultat expérimental : la constance de la vitesse de la lumière observée par Michelson.

Pouvait-on adopter d'autres approches théoriques ?

Les échecs des expériences interférométriques de Michelson auraient-ils pu être expliqués autrement ? Le respect du principe de relativité proposé par Poincaré en 1904 imposait-il réellement d'abandonner à terme la géométrie euclidienne qui est et restera la base de notre culture scientifique ? Existe-t-il d'autres solutions relativistes, ou quasi-relativistes plus simples conceptuellement ?

En un siècle, les immenses progrès de l'électromagnétisme permettent de se poser en termes nouveaux les questions qui préoccupaient les physiciens en 1905. Les calculs et les réalisations d'antennes à balayage électronique nous ont permis de mieux comprendre la propagation en champ proche. Les accélérateurs linéaires et cyclotrons ont permis des expériences nouvelles, riches d'enseignement, sur des particules de haute énergie. Les gyromètres Laser ont des performances incomparables avec le dispositif expérimental de Michelson et Gale qui, en 1925, a mis en évidence la rotation de la terre, grâce à l'effet Sagnac.

Les premières mesures d'électrons rapides :

Oublions pour un temps d'expliquer les résultats de Michelson et considérons les résultats obtenus par Bertozzi en 1964, plus de 50 ans plus tard.

L'énergie cinétique totale d'un électron semble mieux correspondre avec la formule suivante, légèrement différente de la formule de la relativité restreinte :

$$W_m = \frac{W_0}{4} \cdot \left[\frac{1}{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right] = \frac{W_0 \cdot \beta^2}{4} \cdot \left[1 + \frac{1}{1-\beta^2} \right]$$

Dans cette formule W_0 est l'énergie au repos de l'électron et W_m son énergie cinétique. Bien évidemment, pour les vitesses faibles de l'électron, cette énergie cinétique est celle prédite par la mécanique classique.

Selon cette nouvelle hypothèse, l'énergie cinétique de l'électron correspondrait pour moitié à celle d'une masse mécanique et pour moitié à celle d'un champ électromagnétique (on rappelle qu'en 1900, Poincaré avait établi la formule donnant la masse d'une énergie : $m=E/c^2$).

Pour les vitesses de moins de 80% de la vitesse "c" de la lumière, l'énergie cinétique de l'électron prédite par la nouvelle formule proposée reste très proche de la formule relativiste :

$$W_r = W_0 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

Ces deux formules ne diffèrent sensiblement que pour les grandes vitesses supérieures à 80% de "c" pour lesquelles la nouvelle formule semble plus proche des résultats expérimentaux.

La querelle relativiste :

Les théories relativistes (restreinte puis générale) ont alors conduit à des controverses violentes entre partisans et opposants à ces nouvelles théories. Le fait que la vitesse de la lumière soit isotrope quelle que soit la vitesse du laboratoire était en soi surprenant.

Mais cette découverte avait des implications, non seulement dans tout le domaine scientifique, mais aussi dans ceux de la philosophie, voire du religieux. ... Certains ont confondu relativité et relativisme.

D'autres pensaient qu'en mettant en cause l'existence de l'Ether rigide du 19^e siècle, et en ne prenant en compte que l'environnement propre de chaque observateur, cette théorie mettait en péril l'ensemble des connaissances longuement accumulées par les scientifiques.

La relativité générale correspond à l'application du principe de relativité aux repères en accélération relative. En formulant le principe d'équivalence, Einstein avait prédit en 1912 la courbure gravitationnelle des rayons lumineux qui ne sera mesurée qu'en 1916. Malheureusement, les physiciens relativistes ayant refusé de conserver toute notion de milieu de propagation des ondes lumineuses, ne pouvaient expliquer cette courbure des rayons lumineux par une variation gravitationnelle de la vitesse de la lumière.

La théorie de la relativité générale a donc dû faire appel à une géométrie, non euclidienne. Cette nouvelle théorie de la relativité a alors été construite, en collaboration entre Einstein et Grossmann, sur la base de cette géométrie. Le refus d'accepter toute référence à un milieu de propagation, même fictif, avait amené les théoriciens à construire une théorie séduisante, mais d'utilisation bien très trop délicate pour être largement utilisée.

Peut-on faire confiance aux confirmations expérimentales?

Nous oublions trop facilement l'importance des progrès technologiques que nous avons connus depuis le début du 20^e siècle. Réalisés avec la technologie d'aujourd'hui, les appareils utilisés par Michelson, Gale et Miller seraient considérablement plus performants. Les conclusions de ces expérimentateurs seraient-elles les mêmes ?

N'oublions pas que l'horloge mobile de la relativité restreinte est ralentie dans un rapport directement lié à la vitesse de l'interféromètre (il a pour valeur la moyenne géométrique des vitesses d'ondes planes se déplaçant parallèlement et perpendiculairement au mouvement du repère).

Il reste alors à expliquer le fait que l'interféromètre n'ait pas observé d'anisotropie de cette vitesse de propagation de la lumière dans le repère terrestre. Si Michelson avait connu les antennes RADAR à balayage électronique, il aurait pris conscience du fait qu'en champ proche, la vitesse de phase de la lumière n'est pas strictement celle des ondes planes. Ce n'est qu'en champ lointain, lorsque le lobe d'antenne est formé, que la vitesse de phase est égale à c . L'absence de déplacement des franges dans son interféromètre n'était donc pas la preuve de l'absence d'anisotropie de la vitesse de la lumière dans un repère en mouvement.

Il en est de même pour les expériences de Michelson et Gale faites en 1925. Ces chercheurs voulaient observer la rotation de la terre, mais leur dispositif expérimental aurait très bien pu échouer. En effet, depuis que nous réalisons des gyromètres LASER, nous savons qu'ils sont aveugles lorsque leur vitesse angulaire descend en dessous d'un seuil donné. Ce phénomène est maintenant bien connu et clairement expliqué. Une vibration angulaire mécanique, imprimée au gyromètre, permet de masquer ce défaut qui réduirait grandement le domaine d'emploi de ces dispositifs.

Quels développements théoriques aurait-on fait en 1925 si Michelson et Gale n'avaient pas décelé la rotation de la terre ? En aurait-on conclu que les lois de la physique devaient être conservées entre repères en rotation ?

Comment valider les hypothèses scientifiques ?

Nous disposons aujourd'hui d'une technologie incomparable avec celle du début du 20^e siècle. Il serait donc intéressant de refaire, avec la technologie moderne, les expériences fondatrices de notre physique en évitant toute modification des dispositifs pouvant fausser les résultats.

Observons sur un exemple comment des changements, apparemment sans importance, peuvent modifier totalement le résultat d'une expérience. Depuis Michelson, de nombreux interféromètres ont été réalisés. Les plus grands ont pour objectifs de détecter les ondes de gravité prédites par la théorie de la relativité. Cependant, ces équipements ne sont pas des interféromètres de Michelson. Ils sont différents mais abusivement désignés sous le nom.

Considérons en effet l'interféromètre Franco-italien VIRGO. Il est composé de deux interféromètres "Fabry-Perot" de type plan convexe de 3 Km de long, dont les réponses sont comparées en phase. Les directions de propagation des ondes, imposées dans chacun des bras par les "Fabry-Perot", est une propagation en champ proche. Au contraire, dans l'interféromètre de Michelson, la propagation des ondes se fait en espace libre entre la source optique et le détecteur. Ces deux dispositifs ne sont donc pas comparables.

Vers un effondrement de la théorie de la relativité ?

Supposons qu'un interféromètre de Michelson moderne, plus sensible que le plus grand jamais réalisé par Miller, confirme l'existence d'une anisotropie optique de l'espace ?

Cette découverte ruinerait-elle tous les acquis scientifique du 20^e siècle ?

Certainement pas, mais il faudrait se demander comment construire une nouvelle physique respectant l'ensemble des principes énoncés par Poincaré en 1904, y compris le principe de relativité. Essayons d'imaginer ce que serait cet événement, s'il se produisait.

Un rêve de physicien :

En conclusion d'un exposé fait en 2011 à l'URSI, j'affirmais le rôle essentiel du rêve dans la recherche scientifique. J'écrivais : *"Ayant pris conscience de la fragilité des bases expérimentales et conceptuelles de la physique moderne, les étudiants et chercheurs pourront explorer des voies nouvelles. Libre de laisser leur imagination construire, sur les mêmes faits expérimentaux, des concepts et des représentations concrètes des lois de la physique, ils pourront faire preuve de créativité"*.

Bien évidemment, science et science fiction n'étant pas de même nature, les rêves doivent être en permanence confrontés aux réalités expérimentales. Toutes les explications équivalentes des faits expérimentaux doivent être jugées également recevables.

Pendant longtemps, les physiciens se sont classés en relativistes et anti-relativistes. Des personnalités aussi différentes que Pierre Tardi, que j'ai eu comme professeur d'astrophysique à l'Ecole Polytechnique, ou Maurice Allais ne cachaient pas leur réticence ou leur opposition radicale à la théorie de la relativité générale. Le conflit idéologique qui a déchiré les physiciens semble maintenant terminé. Profitons-en pour nous poser une question iconoclaste :

Que se serait-il passé si Michelson avait détecté le mouvement de la terre ?

La construction d'une autre relativité :

En 1925 la mesure d'une dissymétrie optique de l'espace par Miller et de l'effet Sagnac par Michelson et Gale auraient pu initialiser une mise en cause des concepts relativistes. Si ces résultats avaient été indiscutables, ils auraient confirmé l'existence d'un milieu de transmission des ondes électromagnétiques, appelé Ether. Les physiciens auraient construit la physique sur des concepts différents.

L'existence d'un milieu de propagation des ondes électromagnétiques ayant été confirmée, ils auraient naturellement admis que la courbure gravitationnelle des rayons lumineux, vérifiée expérimentalement en 1916, résultait d'une modification gravitationnelle des caractéristiques de ce milieu.

L'incohérence apparente des mesures de vitesse de la terre faites par l'interféromètre de type Michelson, utilisé par Miller au Mont Wilson, les aurait incités à admettre que l'Ether n'est pas un solide mais un fluide...

A ce propos, je tiens à dire qu'au cours des JINA (**J**ournées **I**nternationales de **N**ice sur les **A**ntennes), sans doute en 1986, un élève du Professeur Papiernik avait présenté, hors sessions

officielles, une image iconoclaste : le champ électromagnétique derrière un obstacle. Son codage des données faisait apparaître des allées de Von Karmann, ensembles de tourbillons observés en hydrodynamique. Il avait ajouté que ce n'était pas surprenant, *puisque les équations sont les mêmes*.

Cette nouvelle théorie entreprendrait de décrire de nombreux phénomènes actuellement inexpliqués, comme les difficultés rencontrées dans l'utilisation du vecteur de Poynting.

Une compréhension nouvelle du principe de relativité :

Les physiciens devraient-ils pour autant dû rejeter le principe de relativité ?

Certainement pas. Poincaré avait cité la constance de la vitesse de la lumière comme axiome de la nouvelle physique par respect pour les faits. Il s'agissait d'un résultat expérimental que la physique devait prendre en compte. Si de nouvelles expériences avaient infirmé ce résultat, il aurait abandonné ce choix et aurait reformulé en d'autres termes son principe d'universalité des lois de la physique.

Considérons maintenant le principe d'équivalence proposé par Einstein. Ce principe affirme l'équivalence locale entre accélération et forces de gravitation. Ainsi, la propagation optique est perturbée de la même façon par un champ de gravitation ou par l'accélération du repère dans lequel elle est étudiée. Pour que les lois de la physique soient indépendantes du repère, **ne suffisait-il pas d'introduire dans les lois de l'électromagnétisme l'effet du champ de gravitation ?**

De la même façon, **pourquoi l'anisotropie de l'espace ne correspondrait-elle pas à une vitesse du milieu de propagation ?** Ceux qui refuseraient d'admettre l'existence de ce milieu pour des raisons philosophiques n'auraient qu'à dire qu'il est fictif, un simple artifice de calcul. Par souci de neutralité, ne pourrait-on pas parler que d'un vecteur d'anisotropie ?

Enfin, la dérive vers le rouge du rayonnement des galaxies lointaines serait seulement une indication de distance ; Pourrait-il, au gré des physiciens, ne pas être attribué à un effet Doppler ?

Pourquoi un tel retour en arrière ?

Cette nouvelle approche de la physique aurait trois avantages essentiels:

- Permettre d'utiliser le savoir mathématique accumulé au cours des siècles, en particulier la géométrie euclidienne, base de notre culture scientifique.
- Recréer un temps et un espace absolu, condition nécessaire au respect de nombreux principes, en particulier celui de la conservation de l'énergie.
- Enfin, et ce n'est pas le moindre avantage, permettre de conserver intégralement les acquis de la mécanique et de l'électromagnétisme classiques qui deviendraient relativistes au sens du principe de relativité de Poincaré.

Un nouveau domaine de recherche :

Cette nouvelle physique ne sera réellement construite que lorsque les propriétés du milieu de propagation des ondes électromagnétiques (fictif ou non) seront clairement établies. Celles-ci devraient être analogues à celles d'un fluide. Comme en hydrodynamique, les lois reliant les variations de la vitesse des ondes et de la direction de sa vitesse pourront être établies en variables de Lagrange ou d'Euler. De toutes façons, l'usage d'un repère espace-temps absolu redevient nécessaire.

Conclusion :

La science doit reconnaître avant tout la primauté des faits. Maurice Allais n'a cessé de rappeler cette vérité, aussi bien en économie qu'en physique. Les théories doivent expliquer les faits, donner des résultats précis et avoir des applications concrètes.

La physique doit respecter ses principes fondamentaux, en particulier le principe de relativité, mais avant tout décrire objectivement les faits. En 1904, en énonçant les principes de la physique, Poincaré citait la constance de la vitesse de la lumière pour une unique raison : rendre compte du résultat paradoxal d'une expérience. Il avait supposé la constance de la vitesse de la lumière avéré.

Aujourd'hui, compte tenu des progrès scientifiques, il est raisonnable de mettre en doute l'interprétation par Lorentz de l'expérience de Michelson. Si celle-ci s'avérait erronée, la théorie de la relativité actuelle devrait être abandonnée au profit d'une autre théorie également conforme au principe de relativité.

Si une nouvelle expérience montrait un jour que Lorentz a été victime d'une simple erreur expérimentale, comment nos successeurs pourraient-ils comprendre que nous ayons fait une confiance aveugle à Michelson ? Qu'ensuite nous ayons persisté dans l'erreur au nom d'un principe mal appliqué?

Compte tenu des progrès de la technologie et de nos connaissances, nous devons constamment vérifier les hypothèses sur lesquelles reposent nos théories, et en particulier la contraction de Lorentz.

Que penseront de nous nos descendants s'ils apprennent que nous avons négligé une tâche aussi fondamentale?

Pierre Fuerxer

Ancien adjoint militaire au directeur de Centre National d'Etudes des Télécommunications,
Membre de l'AIRAMA.