

# DE LA RELATIVITÉ DU MOUVEMENT À LA RELATIVITÉ D'ÉCHELLE

à propos de : ***La relativité dans tous ses états.***  
***Au-delà de l'espace-temps.***

par **Laurent NOTTALE**

Hachette (Sciences), 1998.

La théorie de la relativité n'est pas relativiste ! Ce qu'affirme en effet le principe de relativité, ce n'est pas que tout est relatif, comme on l'entend trop souvent dire, mais que les lois de la nature doivent être valides dans tous les systèmes de référence, quel que soit leur mouvement (Einstein, 1915). Ce principe qui sous-tend une recherche d'absolu n'a rien d'étonnant. Il ne fait qu'affirmer que les lois fondamentales de la nature sont uniques, c'est-à-dire qu'elles s'appliquent quelle que soit la situation (si ce n'était pas le cas, elles ne seraient pas des lois fondamentales). Ce principe n'a rien non plus de proprement novateur, puisque toute la physique s'est construite en recherchant des invariants (les lois de la nature, certaines quantités physiques) à travers l'analyse de ce qui est relatif (la perception des phénomènes). Si ce principe, dans sa formulation générale, s'avère donc à la fois nécessaire et évident, son application n'est toutefois pas aisée. Il faut en effet réussir à formuler les lois de la nature de telle sorte qu'elles ne soient pas modifiées si on change de système de référence. Trois grandes étapes ont ainsi été franchies dans l'histoire de la physique.

À partir des réflexions de Galilée qui établissaient que le mouvement et le repos n'avaient aucune existence propre, et que seul avait un sens le mouvement d'un corps relativement à un autre, put être énoncé un théorème fondamental pour la physique moderne : les lois de la nature doivent être les mêmes dans tous les systèmes de référence en mouvement rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres (on appelle ces systèmes de référence des référentiels *inertiels*). Avec Einstein et Poincaré (1905), une nouvelle étape fut franchie. Pour que les lois de l'électromagnétisme puissent s'accorder avec ce principe et qu'il soit possible de rendre compte de l'invariance de la vitesse de la lumière (*cf.* expérience de Michelson-Morley), ils fondèrent la *relativité restreinte*, qui est une théorie où le temps et

Ceci est la version papier d'une page publiée sur le site web de

**REVUE DE LIVRES**

<http://assoc.wanadoo.fr/revue.de.livres/>

Abonnements et commentaires sont les bienvenus à l'adresse suivante :  
[revue.de.livres@wanadoo.fr](mailto:revue.de.livres@wanadoo.fr)

l'espace ne sont plus indépendants. Enfin, en 1915, Einstein généralisa le principe de relativité à tous les systèmes de référence en mouvement : les lois de la physique ne devaient plus être les mêmes uniquement dans les référentiels inertiels, mais aussi pour ceux qui étaient animés d'un mouvement accéléré. Dans cette théorie — appelée *relativité générale* — la gravitation n'existe plus en soi, mais devient relative au choix du système de référence.

A-t-on pour autant atteint la plus grande généralité dans l'application du principe de relativité ? Laurent NOTTALE (né en 1952) pense que non. Depuis quelques années, il tente de l'étendre à la notion d'échelle. Ainsi, les lois de la nature devraient aussi être les mêmes pour toutes les échelles. Or, depuis le début du siècle, on sait que la physique à l'échelle de l'atome (la mécanique quantique) est très différente de celle qui concerne les échelles plus grandes. Il y aurait ainsi comme deux mondes (microscopique et macroscopique) dans lesquels le comportement des objets, soumis à des lois différentes, ne serait en rien comparable. Or, Laurent Nottale essaye justement de montrer que les différences observées ne proviennent pas de lois différentes, mais traduisent le fait que les mêmes lois se manifestent différemment à des échelles différentes. Ce travail n'est toutefois pas encore achevé. Mais s'il aboutit dans les années à venir à unifier complètement ces différents domaines physiques, il fera sans conteste date dans l'histoire des sciences. Cette recherche pointue et ambitieuse mérite donc d'être connue au-delà du cercle des spécialistes. L'effort de vulgarisation entrepris par Laurent Nottale lui-même dans ce livre (voir sommaire p. 9) est par conséquent méritoire. Dans une perspective historique, de Galilée à ses propres recherches, il nous offre avec une grande clarté sa vision de la fécondité du principe de relativité et tente de montrer tout l'intérêt de son extension à la notion d'échelle. Essayons d'y comprendre quelque chose...

### **La relativité galiléenne**

Il est assez facile d'illustrer le principe de la relativité galiléenne du mouvement : enfermé dans un espace clos (cabine d'un bateau, par exemple) qui avance à vitesse constante par rapport à un référentiel donné (le rivage), nous pouvons nous comporter (marcher, jongler...) comme si le bateau était à quai. Les lois de la mécanique auxquelles nous sommes soumis sont donc les mêmes dans le référentiel défini par le bateau et dans celui défini par le rivage. Il suffit en revanche que notre bateau se mette à accélérer ou à virer pour que nous en éprouvions tout de suite les effets. Les lois de la

mécanique ne sont donc plus identiques à celles qui existaient quand le bateau était au repos : il y a apparition de forces d'inertie.

Autre exemple : un baquet rempli d'eau qui présente une surface plane en cas de repos ou de mouvement uniforme, verra sa surface s'incurver dès lors qu'il se mettra à tourner sur lui-même. On peut donc, apparemment, définir l'immobilité ou la rotation du baquet, uniquement par la forme de la surface de l'eau. On voit aussi que la différence entre les référentiels en rotation, ou d'une manière générale accélérés, et les référentiels inertiels provient de la nécessité d'appliquer une force d'inertie aux objets liés aux premiers (pour incurver la surface de l'eau, par exemple) et non aux objets liés aux seconds. C'est pourquoi la relativité galiléenne ne concerne que les référentiels inertiels ; c'est uniquement dans ces référentiels que les lois de la mécanique sont les mêmes. Pour que le principe de relativité soit étendu à tous les systèmes de référence (accélérés ou non), il faudra attendre la relativité générale (1915). Mais il faudra d'abord que soit construite la relativité restreinte (1905).

### **La relativité restreinte**

Deux grands problèmes se posaient alors à la physique. Quand Michelson et Morley en 1881 voulurent déterminer le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, substance immatérielle supposée remplir l'espace, ils obtinrent un résultat étrange. En mesurant la vitesse de la lumière se propageant parallèlement et perpendiculairement au mouvement de la Terre sur son orbite, ils auraient dû trouver deux résultats différents puisque la vitesse d'une onde (ici la lumière) dépend de la vitesse du milieu (ici l'éther) dans lequel elle se propage ou, ce qui revient au même, de la vitesse de l'observateur par rapport au milieu considéré comme immobile, comme c'était le cas pour l'éther. Or, quelle que soit la direction de propagation, la vitesse de la lumière fut la même. Ce résultat était absurde. Il remettait en cause le principe de l'additivité des vitesses. Ce qui n'était pas sans faire écho à une propriété de l'infini : l'infini plus n'importe quelle quantité est toujours égal à l'infini. Ainsi la vitesse de la lumière, bien que finie, avait les propriétés d'une vitesse infinie.

L'autre problème concernait les équations de Maxwell décrivant les ondes électromagnétiques, dont la lumière : elles ne respectaient pas le principe de la relativité galiléenne, c'est-à-dire qu'elles n'étaient pas invariantes quand on les écrivait dans deux référentiels inertiels. Cette opération mathématique est assez facile à effectuer. Pour réécrire une

équation d'onde dans un référentiel ( $R$ ) en mouvement uniforme (vitesse  $v$ =constante) par rapport à un référentiel ( $R$ ), il suffit d'établir les coordonnées de l'onde ( $x$ ) en fonction de ses coordonnées ( $x'$ ) dans le nouveau référentiel. Si l'on considère que l'espace et le temps sont indépendants — hypothèse que la théorie de la relativité restreinte abandonnera — on obtient une relation du type :  $x=x'+vt$  (où  $t$  représente le temps). On aboutit ainsi à une nouvelle équation d'onde qui dépend des coordonnées de l'onde dans le référentiel en mouvement et qui, si le principe de la relativité galiléenne était respecté, aurait la même forme que celle de la première équation. Ce n'était pourtant pas le cas. C'est pourquoi Poincaré — dont Laurent Nottale réhabilite ici la contribution à la construction de la relativité restreinte — et Einstein pensèrent à lier l'espace et le temps de façon à rendre les équations de l'électromagnétisme invariantes dans ces changements de référentiels.

Cette transformation de la structure de l'espace et du temps implique un phénomène apparemment étrange : il existe une vitesse maximale invariante. Cette dernière fut initialement identifiée à la vitesse de la lumière, mais elle peut être la vitesse dans le vide de n'importe quelle autre entité de masse nulle. Par ailleurs, dans l'espace-temps ainsi défini, la notion de simultanéité de deux événements ne peut plus être absolue : si deux événements sont simultanés dans un certain référentiel, ils ne le sont plus forcément dans un autre (puisque le temps est lié à l'espace). Il en résulte aussi qu'un objet se déplaçant devant nous semble se raccourcir par rapport à la longueur qu'il a quand il est au repos (contraction des longueurs). De même, un phénomène temporel dure plus longtemps dans un référentiel où il est en mouvement que dans son référentiel de repos (dilatation du temps). Ces propriétés apparemment surprenantes, peuvent être saisies intuitivement si l'on prend en compte qu'elles apparaissent dans un espace à quatre dimensions (trois dimensions spatiales et une dimension temporelle) : elles sont en effet analogues à la propriété qu'a la longueur d'un objet, dans l'espace qui nous est familier (trois dimensions spatiales ; le temps étant indépendant), de nous paraître plus courte si nous l'observons de biais ; ainsi la contraction des longueurs et la dilatation des temps proviennent des « rotations » de l'espace-temps.

Toutefois ces propriétés n'apparaissent que si la vitesse des objets est « proche » de la vitesse maximale. Quand la vitesse est « très » inférieure à cette vitesse maximale, on retrouve les propriétés de l'espace classique à trois dimensions (la rotation dans l'espace-temps est trop faible pour être

apparente). C'est pourquoi nous n'avons pas l'impression de vivre dans l'espace-temps de la relativité restreinte. En revanche, dès qu'on étudie des objets se déplaçant à très grande vitesse, comme en physique des particules, on constate qu'ils se comportent de la façon prédite par la nouvelle théorie.

On peut maintenant revenir sur l'expérience de Michelson-Morley. Elle soulignait que le principe de l'additivité des vitesses ne s'appliquait pas à la lumière, ce qui voulait dire que sa vitesse, bien que finie, se comportait comme une vitesse infinie. Ce paradoxe vient, selon Laurent Nottale, du fait qu'on pense avec des concepts (par exemple, la vitesse) propres à l'espace classique à trois dimensions alors que nous sommes dans un espace-temps à quatre dimensions. Il peut alors considérer que la finitude de la vitesse de la lumière n'est qu'un effet de perspective, de la même façon que deux droites parallèles, qui se croisent à l'infini, semblent visuellement converger en un point à une distance finie. Si l'on définissait pour la lumière dans l'espace à quatre dimensions une « quadrivitesse », celle-ci serait effectivement infinie. La relativité restreinte, qui se ramène finalement à l'existence de l'espace-temps, permet donc d'expliquer le résultat de l'expérience de Michelson-Morley. Avec l'extension du principe de relativité aux phénomènes électromagnétiques, elle montrait ainsi toute sa richesse.

Le problème est que, dans ce cadre de la relativité restreinte, les équations qui faisaient intervenir la gravitation ne restaient plus invariantes quand on les écrivait dans des référentiels inertiels différents. Sans compter que les lois de la physique n'étaient toujours pas invariantes dans des changements de référentiels accélérés. Il fallut attendre quelques années pour qu'Einstein, avec la théorie de la relativité générale, trouvât une structure de l'espace-temps pour laquelle ces deux restrictions du principe de relativité n'apparaissent plus.

### **La relativité générale**

Einstein partit d'une expérience de pensée : si une personne tombe en chute libre, elle ne sent plus son propre poids. C'est-à-dire que l'accélération de la chute fait disparaître les effets de la gravitation. Il en déduisit le *principe d'équivalence*, suivant lequel la gravitation est localement équivalente à une accélération. Ce principe souligne que la gravitation n'existe pas en soi, mais dépend du choix du référentiel. Si nous ressentons la gravitation sur Terre, ce n'est plus parce qu'une force nous attirerait vers son centre, mais parce que nous sommes liés à un référentiel particulier. Si nous étions

dans un référentiel en chute libre, nous ne sentirions effectivement plus la gravitation.

Einstein en déduisit qu'une personne, enfermée dans un vaisseau spatial en chute libre et poussant un objet, voit ce dernier avancer en ligne droite (jusqu'à ce qu'il rencontre une paroi) puisque les effets de la gravitation ont disparu. Pour un observateur terrestre, qui reste soumis à la gravitation et qui regarde le vaisseau tomber, la trajectoire de l'objet est en revanche une courbe. Ainsi, une droite, dans un référentiel où il n'y a pas de gravitation, est une courbe dans un référentiel où la gravitation est présente. C'est-à-dire que la gravitation et la courbure de l'espace peuvent être considérées comme une seule et même chose.

C'est pourquoi Einstein fit l'hypothèse que l'espace-temps n'était pas plat mais courbe. Pour comprendre ce qu'est un espace courbe il faut se placer sur la surface d'une sphère et imaginer que non seulement les êtres humains mais tous les objets sont des êtres à deux dimensions et qu'ils se propagent uniquement sur cette sphère ; sauf que l'espace-temps courbe d'Einstein n'est pas « plongé » dans un espace de dimension supérieure comme l'est une sphère dans l'espace à trois dimensions, mais représente la totalité de l'univers. Einstein pouvait ainsi voir les effets de la gravitation comme la manifestation d'un changement de courbure de l'espace-temps occasionné par la matière et l'énergie. Le mouvement d'une particule soumise à la gravitation se ramenait au mouvement d'une particule non accélérée dans l'espace-temps courbe. Il devenait alors possible de montrer que les lois de la nature étaient les mêmes dans tous les systèmes de référence, quel que soit leur mouvement. Les deux limitations de ce principe, relatives à la gravitation et aux référentiels accélérés, étaient donc éliminées ensemble.

### **La relativité d'échelle**

Est-il envisageable de généraliser encore le principe de relativité ? C'est-à-dire, peut-on trouver une théorie physique valable pour toutes les échelles ? Cela n'a rien d'évident quand on pense que les lois de la microphysique (la mécanique quantique) sont actuellement différentes de celles de la physique macroscopique. Mais justement, Laurent Nottale pense qu'il est possible de montrer que les différences observées ne proviennent pas de lois différentes, mais traduisent le fait que les mêmes lois se manifestent différemment à des échelles différentes.

Pour saisir intuitivement l'idée qui sous-tend cette nouvelle approche, il faut prendre conscience que certaines grandeurs physiques changent de valeur suivant l'échelle à laquelle on les mesure. Un exemple célèbre est la longueur de la côte bretonne, qui dépend de l'échelle de la carte à partir de laquelle on veut la déterminer. Plus la carte donne accès à des petits détails, plus il apparaît de golfes, criques et autres renforcements qui augmentent cette longueur. Les objets tels que la côte bretonne sont appelés « fractals ». On peut les définir comme des objets qui n'ont aucune portion de surface « lisse ». Le mathématicien dit qu'on ne peut pas tracer de tangente à leur contour, ou que ce dernier n'est pas *différentiable*.

Par ailleurs, un objet non fractal à grande échelle peut le devenir à petite échelle. Le périmètre d'une feuille de papier, par exemple, ne semble pas dépendre de la résolution avec laquelle on effectue nos mesures. En passant du centimètre au millimètre on obtient seulement une valeur de plus en plus précise. Pourtant, à partir d'une certaine échelle, plus on augmente la résolution, plus les irrégularités de la feuille apparaissent. Le périmètre se met donc à augmenter avec la diminution de l'échelle de résolution. Ce phénomène de transition *non-fractal/fractal* donne une illustration de ce que peut être la transition *physique classique/physique quantique*.

C'est pourquoi l'idée de Laurent Nottale consiste à supposer non pas que tel ou tel objet soit fractal mais que la structure de l'espace-temps courbe soit elle-même fractale. Ce n'est pas une hypothèse *ad hoc*. Cela consiste au contraire à éliminer l'hypothèse simplificatrice de différentiabilité de l'espace-temps courbe. Il n'en demeure pas moins que l'on peut encore utiliser cette hypothèse dans une grande partie de la physique, de la même façon que l'on considère que le pourtour d'une feuille est différentiable (sans rugosité) pour calculer son périmètre. Mais dès que l'on s'intéresse aux petites échelles de l'univers quantique, Laurent Nottale montre que l'on peut, en éliminant cette hypothèse de différentiabilité, retrouver les lois de la physique quantique — du moins une partie d'entre elles pour l'instant — en partant des propriétés de l'espace-temps fractal. Il semble ainsi que l'on puisse appliquer de façon plus générale que ne l'avait fait Einstein le principe de relativité.

En tout cas, cette unification de la physique quantique et de la physique macroscopique, dans le cadre d'un espace-temps courbe fractal, s'accompagne d'un bouleversement de nos approches de l'univers dans l'infiniment petit et dans l'infiniment grand. On a vu précédemment que,

dans la cadre de la relativité restreinte, l'exigence d'invariance des lois de la physique par changement de référentiels inertiels entraînait la construction d'un espace-temps où il existait une vitesse maximale finie qui avait les propriétés de l'infini. Or, exiger une invariance par changement d'échelle dans la nouvelle théorie fait jouer à la résolution un rôle analogue à celui que la vitesse jouait dans la relativité restreinte. Sauf qu'ici on en déduit l'existence à la fois d'une échelle maximale et d'une échelle minimale. La première se comporte comme si elle avait une valeur « infinie » et la seconde la valeur « zéro » (si on divise ou multiplie une de ces échelles par un nombre quelconque on obtient la même échelle). Il ne faut pas voir ces échelles comme des barrières infranchissables mais plutôt comme des horizons inaccessibles. Ainsi l'espace reste indéfiniment divisible, mais le résultat des divisions est limité : on obtient toujours une longueur supérieure à l'échelle minimale. Il n'y donc plus de sens à parler d'une longueur plus petite que l'échelle minimale. De même, si on observe l'univers à très grande échelle — univers dont les cosmologistes ne peuvent dire à ce jour s'il est infini ou fini —, on verra une sphère limite autour de soi, qui sera toutefois inaccessible si l'on voulait se déplacer pour l'atteindre. Ainsi, de notre point de vue, tout se passe donc comme si l'univers était sans fin bien qu'il nous paraisse fini, et cela indépendamment du fait qu'il puisse être réellement fini ou infini.

La modification de notre approche de l'univers concerne aussi l'aspect temporel. À l'échelle minimale on peut en effet associer une durée minimale (le temps et l'espace étant liés) qui représente aussi un horizon temporel inaccessible et qui, bien que différente de zéro, se comporte comme si elle avait cette valeur (si on divise cette durée par un nombre quelconque on obtient la même durée). Il n'est donc plus possible de considérer une durée inférieure à cette durée minimale comme il n'était pas possible d'aller plus vite que la lumière. Il s'ensuit qu'il n'y a plus de sens à parler des premiers instants de l'univers pour un temps inférieur à cette durée minimale. Et puisqu'en remontant le temps, on n'atteint jamais cet « horizon », on peut dire que tout se passe comme si l'univers n'avait pas d'origine dans le temps bien qu'il ait un âge fini.

Voilà esquissées sommairement quelques idées relatives à cette extension du principe de relativité à la notion d'échelle, avec laquelle Laurent Nottale tente à sa façon de ramener la diversité des phénomènes à un ensemble unique de lois. Cette tentative ambitieuse sera-t-elle couronnée

de succès ? En tout cas, quelle que soit la réponse, ce livre mérite d'être lu. En effet, Laurent Nottale ne se contente pas d'y exposer sa théorie avec bien sûr plus de détails que nous ne l'avons fait, il s'efforce de l'inscrire dans une perspective historique où chaque changement conceptuel est analysé avec pertinence. C'est donc aussi une belle réflexion sur l'évolution de l'idée de relativité en physique. De plus, pour ne pas déroger à l'exigence de réfutabilité, Laurent Nottale propose un certain nombre de résultats théoriques, concernant aussi bien la physique des particules que la cosmologie, susceptibles d'être confirmés ou infirmés par des expériences en cours ou à venir. C'est donc un travail de vulgarisation accompli dont le versant « recherche » est à suivre de près...

Thomas LEPELTIER,  
le 28 avril 1999.

## Sommaire

Avant-propos

### **Première partie : Les théories de la relativité du mouvement**

- I. Le précurseur : Copernic et l'héliocentrisme
- II. Le découvreur : Galilée et les lois de l'inertie
- III. Newton : Gravitation universelle et espace absolu
- IV. La relativité restreinte
- V. La relativité généralisée d'Einstein

### **Deuxième partie : Le principe de relativité**

- VI. Sens du principe de relativité
- VII. Vers une nouvelle extension de la relativité

### **Troisième partie : La mécanique quantique**

- VIII. Principaux axiomes de la mécanique quantique
- IX. Le paradoxe des propriétés quantiques
- X. Einstein et la théorie quantique

### **Quatrième partie : Relativité d'échelle, espace-temps fractal et mécanique quantique**

- XI. Les échelles dans la nature
- XII. La notion de point et d'instant en physique
- XIII. La géométrie fractale
- XIV. Le « chaînon manquant » en théorie quantique
- XV. La relativité d'échelle
- XVI. Relativité d'échelle restreinte
- XVII. Relativité d'échelle et théorie quantique

### **Cinquième partie : Des particules élémentaires aux grandes structures de l'Univers**

- XVIII. Physique des particules
- XIX. Cosmologie
- XX. Formation et évolution de structures

Conclusion

Glossaire

320 pages

ISBN 23.5278.998.X

130 FF (1999)