

L'ÉTHER

ET LA

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

PAR

Albert EINSTEIN

---

Traduction française par Maurice SOLOVINE



PARIS

GAUTHIER-VILLARS et C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES  
55. Quai des Grands-Angustins, 55

—  
1921



---

# L'ÉTHER

ET LA

## THÉORIE DE LA RELATIVITÉ <sup>(1)</sup>

---

Comment les physiciens arrivent-ils à admettre, à côté de l'idée de la matière pondérable, obtenue par abstraction de la vie journalière, l'idée de l'existence d'une autre matière, de l'éther ? On en trouve la raison bien certainement dans les phénomènes qui ont donné lieu à la théorie des forces agissant à distance, et dans les propriétés de la lumière qui ont conduit à la théorie ondulatoire. Nous allons consacrer à ces deux sujets un bref examen.

La pensée non exercée aux recherches physiques ne sait rien de forces agissant à distance. Quand on essaie d'établir un enchaînement causal entre les expériences faites sur les corps, il semble d'abord qu'il n'y ait pas d'autres actions réciproques que celles par contact immédiat, par exemple : translation de mouvement par choc, pression ou traction, échauffement ou combustion mise en action par une flamme, etc. Certes, déjà dans l'expérience journalière, la pesanteur, c'est-à-dire une force agissant à distance, joue un rôle important. Mais, comme dans l'expérience journalière la pesanteur nous

(1) Conférence faite à l'Université de Leyde le 5 mai 1920.

apparaît comme quelque chose de constant, qui n'est point lié à une cause variable avec l'espace et le temps, nous n'imaginons aucunement dans la vie quotidienne une cause pour la pesanteur, et sa faculté d'agir à distance ne se présente par conséquent pas à notre conscience. C'est seulement par la théorie de la gravitation de Newton qu'une cause fut établie pour la pesanteur, celle-ci étant considérée comme une force agissant à distance et provenant de masses. La théorie de Newton marque bien le pas le plus considérable qui ait jamais été réalisé par l'esprit humain dans son effort d'établir un enchaînement causal entre les phénomènes de la nature. Et cependant, cette théorie engendra chez les contemporains de Newton un vif malaise, parce qu'elle semblait être en contradiction avec ce principe, découlant d'autres expériences, que l'action réciproque ne peut avoir lieu que par contact et nullement par l'action à distance sans milieu intermédiaire.

Le désir de connaître inhérent à l'homme ne supporte qu'avec répugnance un tel dualisme. Comment pouvait-on sauver la conception unitaire des forces de la nature ? Ou bien on pouvait essayer de concevoir que les forces, qui se présentent à nous comme agissant par contact, agissent également à distance, distance, bien entendu, très petite — et c'est ce chemin qu'ont suivi de préférence les successeurs immédiats de Newton qui étaient sous le charme de sa doctrine — ou bien on pouvait admettre que les forces agissant à distance de Newton ne sont telles qu'en apparence, et qu'en réalité elles sont transportées par un milieu qui pénètre tout l'espace, c'est-à-dire soit par des mouvements, soit par la déformation élastique de ce milieu. C'est ainsi que l'effort d'établir l'unité dans notre conception de la nature des forces conduit à l'hypothèse de l'éther. Celle-ci n'apporta, tout d'abord, à la théorie de la gravitation et à la physique en général aucun progrès,

de sorte qu'on s'était habitué à considérer la loi des forces de Newton comme un axiome irréductible. Mais l'hypothèse de l'éther jouait toujours un rôle dans la pensée des physiciens, quoique ce rôle ait été la plupart du temps purement latent.

Lorsque, dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, on s'aperçut de la ressemblance très grande qui existe entre les propriétés de la lumière et celles des ondes élastiques dans les corps pondérables, l'hypothèse de l'éther gagna un nouvel appui. Il sembla indubitable que la lumière doit être considérée comme un processus vibratoire d'un milieu élastique et inerte, qui remplit tout l'espace de l'univers. Il sembla encore suivre avec nécessité de la polarisation de la lumière que ce milieu, l'éther, doit posséder les caractères d'un corps solide, car ce n'est que dans un corps pareil, et non pas dans un fluide, que les ondes transversales sont possibles. On devait aboutir ainsi à la théorie de l'éther lumineux *quasi-rigide*, dont les parties ne peuvent effectuer d'autres mouvements, les uns par rapport aux autres, que les petits mouvements de déformation qui correspondent aux ondes lumineuses.

Cette théorie, appelée aussi *théorie de l'éther lumineux immobile*, trouva de plus un appui solide dans l'expérience fondamentale de Fizeau, qui était aussi d'une grande importance pour la théorie de la relativité restreinte, et dont on était obligé de conclure que l'éther lumineux ne prend point part aux mouvements des corps. Le phénomène de l'aberration était également favorable à la théorie de l'éther *quasi-rigide*.

L'évolution de la théorie de l'électricité, dans la voie tracée par Maxwell et Lorentz, amena un changement singulier et inattendu dans l'évolution de nos conceptions concernant l'éther. Pour Maxwell lui-même, l'éther était encore une chose douée de propriétés purement mécaniques, quoique ces propriétés aient été d'un genre beaucoup plus complexe que

celles des corps solides tangibles. Mais, ni Maxwell ni ses successeurs ne réussirent à imaginer un modèle mécanique pour l'éther, capable de fournir une interprétation mécanique satisfaisante des lois du champ électromagnétique de Maxwell. Les lois étaient claires et simples, les interprétations mécaniques lourdes et contradictoires. Les théoriciens de la physique s'adaptèrent presque insensiblement à cet état de choses, qui était bien affligeant pour leur point de vue mécanistique, surtout sous l'influence des recherches électrodynamiques de Heinrich Hertz. Tandis qu'ils exigeaient jadis d'une théorie définitive de satisfaire à tout avec les notions fondamentales appartenant exclusivement à la mécanique — telles que densité de masses, vitesses, déformations et forces de pression — ils s'habituerent petit à petit à admettre, à côté des notions mécaniques, des champs de force électrique et magnétique comme notions fondamentales, sans demander qu'on en donne une interprétation mécanique. Et c'est ainsi que la conception mécanistique de la nature fut peu à peu abandonnée. Mais ce changement conduisit à un dualisme dans les principes qui, à la longue, devint intolérable. Pour lui échapper, on essaya inversement de réduire les principes mécaniques aux principes électriques, étant donné surtout que les expériences faites sur les rayons  $\beta$  et les rayons cathodiques de grande vitesse ont fortement ébranlé la confiance en la validité rigoureuse des équations mécaniques de Newton.

Chez H. Hertz, ce dualisme se montre sans aucune atténuation. Chez lui, la matière apparaît non seulement comme substratum des vitesses, de l'énergie cinétique et des forces de pression mécaniques, mais aussi comme substratum des champs électromagnétiques. Mais, comme de pareils champs se manifestent aussi dans le vide — c'est-à-dire dans l'éther

libre — l'éther lui-même apparaît comme substratum de champs électromagnétiques. Il est de tous points semblable à la matière pondérable et occupe le même rang qu'elle. Dans la matière, il prend part aux mouvements de celle-ci et possède partout dans l'espace vide une vitesse, de sorte que la vitesse de l'éther est distribuée d'une façon continue dans tout l'espace. En principe, l'éther de Hertz ne se distingue en rien de la matière pondérable, qui est composée en partie d'éther.

La théorie de Hertz n'avait pas seulement le défaut d'attribuer à la matière et à l'éther, d'une part, des propriétés mécaniques, et, d'autre part, des propriétés électriques, qui n'ont entre elles aucune liaison logique, mais elle était aussi en contradiction avec le résultat de l'importante expérience de Fizeau sur la vitesse de propagation de la lumière dans des fluides en mouvement, et d'autres résultats solides obtenus par l'expérience.

Les choses en étaient là lorsque H.-A. Lorentz intervint. Par une merveilleuse simplification des fondements théoriques, il est arrivé à établir l'accord entre la théorie et l'expérience. Il réalisa ce progrès de la théorie de l'électricité — le plus considérable depuis Maxwell — en dépouillant l'éther de ses propriétés mécaniques, et la matière de ses propriétés électromagnétiques. Non seulement dans l'espace vide, mais aussi à l'intérieur des corps matériels, l'éther seul, et non pas la matière atomique, est le siège des champs électromagnétiques. Les particules élémentaires de la matière sont, d'après Lorentz, seules capables d'effectuer des mouvements; leur action électromagnétique réside uniquement en ceci qu'elles portent des charges électriques. Lorentz réussit ainsi à réduire toute action électromagnétique aux équations des champs dans le vide établies par Maxwell.

En ce qui concerne la nature mécanique de l'éther de Lorentz, on peut dire plaisamment que l'immobilité est la seule propriété mécanique que Lorentz lui a encore laissée. On peut ajouter que le changement total opéré par la théorie de la relativité restreinte dans la conception de l'éther consistait en ceci, qu'elle dépouilla l'éther de sa dernière propriété mécanique, c'est-à-dire de l'immobilité. Nous allons montrer tout de suite comment cela doit être entendu.

La théorie du champ électromagnétique de Maxwell-Lorentz a servi de modèle à la théorie d'espace-temps et à la cinématique de la théorie de la relativité restreinte. Cette théorie satisfait par conséquent aux conditions de la théorie de la relativité restreinte; mais elle reçoit, quand on l'envisage au point de vue de la dernière, un aspect nouveau. Soit  $K$  un système de coordonnées, par rapport auquel l'éther de Lorentz se trouve en repos. Les équations de Maxwell-Lorentz restent tout d'abord valables par rapport à  $K$ . Mais, d'après la théorie de la relativité restreinte, les mêmes équations restent valables dans le même sens par rapport à tout nouveau système de coordonnées  $K'$ , qui se trouve dans un mouvement de translation uniforme par rapport à  $K$ . Il se pose maintenant la question troublante : Pourquoi faut-il que je donne en théorie au système  $K$ , auquel les systèmes  $K'$  sont physiquement complètement équivalents, une préférence marquée, en supposant que l'éther se trouve en repos par rapport à lui ? Une telle asymétrie dans l'édifice théorique, à laquelle ne correspond aucune asymétrie dans le système des expériences, est insupportable pour le théoricien. Il me semble que l'équivalence physique entre  $K$  et  $K'$ , si elle n'est pas logiquement irréconciliable avec la supposition que l'éther est immobile par rapport à  $K$  et en mouvement par rapport à  $K'$ , ne s'accommode cependant pas bien avec elle.



Le point de vue qu'on pouvait, au premier abord, adopter en face de cet état de choses semblait être le suivant : l'éther n'existe point du tout. Les champs électromagnétiques ne représentent pas des états d'un milieu, mais sont des réalités indépendantes, qui ne peuvent être réduites à rien d'autre et qui ne sont liées à aucun substratum, exactement comme les atomes de la matière pondérable. Cette conception s'impose d'autant plus que, selon la théorie de Lorentz, le rayonnement électromagnétique porte avec soi le pouvoir d'impulsion et de l'énergie, comme la matière pondérable, et parce que, d'après la théorie de la relativité restreinte, la matière et le rayonnement ne sont tous les deux que des formes particulières de l'énergie éparse. La masse pondérable perd ainsi sa position privilégiée et n'apparaît que comme une forme particulière de l'énergie.

Une réflexion plus attentive nous apprend pourtant que cette négation de l'éther n'est pas nécessairement exigée par le principe de la relativité restreinte. On peut admettre l'existence de l'éther, mais il faut alors renoncer à lui attribuer un état de mouvement déterminé, c'est-à-dire il faut le dépouiller par l'abstraction de son dernier caractère mécanique, que Lorentz lui a encore laissé. Nous verrons plus tard que cette façon de voir, — dont la possibilité logique sera rendue tout à l'heure plus évidente par une comparaison quelque peu boiteuse —, est justifiée par les résultats de la théorie de la relativité générale.

Qu'on imagine des ondes sur la surface de l'eau. Ce phénomène peut donner lieu à deux descriptions tout à fait différentes. On peut d'abord suivre comment la surface ondulatoire, qui forme la limite entre l'eau et l'air, change avec le temps. Mais on peut aussi — à l'aide par exemple de petits corps flottants — suivre comment la position de chaque par-

ticule d'eau change avec le temps. A supposer qu'il n'y eût pas de tels petits corps flottants nous permettant de suivre le mouvement des particules du fluide, et qu'en général on n'observât dans tout ce phénomène que le changement de position de l'espace occupé par l'eau — lequel changement s'effectue dans le temps — nous n'aurions alors aucun motif d'admettre que l'eau est composée de particules mobiles. Mais nous pourrions quand même la considérer comme milieu.

Quelque chose de semblable se présente dans le champ électromagnétique. Car on peut se représenter le champ comme étant constitué de lignes de force. Si l'on veut considérer ces lignes de force comme quelque chose de matériel dans le sens habituel, on est tenté de considérer les phénomènes dynamiques comme phénomènes de mouvements de ces lignes de force, de sorte que chaque ligne de force pourrait être suivie dans le temps. Mais il est bien connu qu'une telle façon de voir conduit à des contradictions.

En généralisant, nous pouvons dire : on peut imaginer des objets physiques étendus où la notion de mouvement ne trouve aucune application. Ils ne doivent pas être conçus comme étant constitués de particules, dont chacune pourrait être suivie dans le temps. Dans le langage de Minkowski, ceci s'exprime de la façon suivante : on ne peut pas regarder chaque objet étendu, dans l'univers à quatre dimensions, comme étant composé de fils cosmiques. Le principe de la relativité restreinte nous interdit de considérer l'éther comme constitué de particules qu'on peut suivre dans le temps; mais l'hypothèse de l'éther comme telle ne contredit pas la théorie de la relativité restreinte. Il faut seulement se garder d'attribuer à l'éther un état de mouvement.

Certes, du point de vue de la théorie de la relativité res-

treinte, l'hypothèse de l'éther apparaît tout d'abord comme une hypothèse vide. Dans les équations des champs électromagnétiques ne se présentent, outre les densités des charges, que les intensités des champs. L'action des phénomènes électromagnétiques dans le vide semble être complètement déterminée par cette loi interne, sans être influencée par d'autres grandeurs physiques. Les champs électromagnétiques apparaissent comme des réalités ultimes et irréductibles, et il semble, au premier abord, superflu de postuler un éther homogène et isotrope, dont ces champs devraient être considérés comme représentant les états.

Mais on peut, d'autre part, alléguer en faveur de l'hypothèse de l'éther un argument important. Nier l'éther, signifie en dernier lieu qu'il faut supposer que l'espace vide ne possède aucune propriété physique. Or, les faits fondamentaux de la mécanique ne se trouvent pas d'accord avec cette conception. L'état mécanique d'un système de corps qui flotte librement dans l'espace vide dépend, non seulement de ses positions relatives (distances) et de ses vitesses relatives, mais encore de son état de rotation qui, du point de vue physique, ne doit pas être conçu comme un caractère appartenant au système en soi. Pour concevoir la rotation du système comme quelque chose de réel, ne fût-ce qu'au point de vue formel, Newton a objectivé l'espace. Par le fait qu'il place son espace absolu parmi les objets réels, la rotation par rapport à l'espace absolu devient aussi une réalité. Newton aurait pu aussi bien appeler son espace absolu *éther*; ce qui importe principalement, c'est de supposer comme réel, à côté des objets accessibles à l'observation, un objet qui est inaccessible, afin de pouvoir regarder l'accélération ou la rotation comme quelque chose de réel.

Il est vrai que Mach, pour échapper à la nécessité de sup-

poser une réalité inaccessible à l'observation, s'efforça d'introduire en mécanique, à la place de l'accélération par rapport à l'espace absolu, l'accélération moyenne par rapport à la totalité des masses de l'univers. Mais la force d'inertie envers l'accélération relative de masses éloignées suppose une action à distance sans milieu intermédiaire. Et comme le physicien moderne ne se croit pas en droit d'accepter une action pareille, il aboutit par cette conception aussi à l'éther, qui est destiné à transmettre les effets de l'inertie. Mais cette notion de l'éther, à laquelle conduit la façon de voir de Mach, se distingue essentiellement de l'éther tel qu'il a été conçu par Newton, Fresnel et H.-A. Lorentz. Cet éther de Mach ne détermine pas seulement l'état des masses inertes, mais est lui-même déterminé par elles.

La pensée de Mach reçoit son plein épanouissement dans l'éther de la théorie de la relativité générale. D'après cette théorie, les propriétés métriques du continu spatio-temporel sont différentes dans l'entourage de chaque point spatio-temporel et conditionnées par la matière qui se trouve en dehors de la région considérée. Ce changement spatio-temporel des relations entre les règles de mesure et les horloges, ou la conviction que *l'espace vide* n'est physiquement ni homogène, ni isotrope — ce qui nous oblige à représenter son état par dix fonctions, les potentiels de gravitation  $g_{\mu\nu}$  — ces faits, dis-je, ont définitivement écarté la conception que l'espace serait physiquement vide. Par cela, la notion de l'éther a de nouveau acquis un contenu précis, contenu certes qui diffère notablement de celui de l'éther de la théorie ondulatoire mécanique de la lumière. L'éther de la théorie de la relativité générale est un milieu privé de toutes les propriétés mécaniques et cinématiques, mais qui détermine les phénomènes mécaniques (et électromagnétiques).

Ce qu'il y a de particulièrement nouveau dans l'éther de la théorie de la relativité générale, quand on le compare à l'éther de Lorentz, consiste en ceci que l'état du premier est déterminé, en chaque lieu, par des connexions avec la matière qui obéissent à certaines lois, et par l'état de l'éther des lieux voisins sous forme d'équations différentielles, tandis que l'état de l'éther de Lorentz, en l'absence de champs électromagnétiques, n'est déterminé par rien en dehors de lui et est partout le même. L'éther de la théorie de la relativité générale peut être ramené par la pensée à celui de Lorentz, si l'on remplace les fonctions spatiales, qui servent à le décrire, par des constantes, et si l'on fait abstraction des causes qui déterminent son état. On peut, par conséquent, aussi dire que l'éther de la théorie de la relativité générale a été déduit de celui de Lorentz par voie de relativation (1).

Sur le rôle que l'éther est appelé à jouer dans la conception du monde physique de l'avenir, nous ne sommes pas encore fixé. Nous savons qu'il détermine les relations métriques dans le continu spatio-temporel, par exemple, les possibilités de configuration des corps solides aussi bien que les champs de gravitation; mais nous ne savons pas s'il joue un rôle essentiel dans la formation des particules élémentaires de l'électricité qui constituent la matière. Nous ne savons pas non plus si sa structure ne diffère essentiellement de celle de l'éther de Lorentz que dans le voisinage de masses pondérables, et si la géométrie des espaces de dimensions cosmiques est approximativement euclidienne. Mais nous pouvons affirmer, en nous basant sur les équations relativistes de la gravitation,

---

(1) Nous avons été obligé de forger ce mot pour traduire le mot allemand *Relativierung*, qui exprime admirablement bien la pensée d'Einstein, mais qui n'a pas d'équivalent dans la langue française.

qu'un écart de la forme euclidienne doit se manifester dans les espaces de dimensions cosmiques, toutes les fois qu'une densité positive moyenne de la matière, si réduite soit-elle, existe dans le monde. Dans ce cas, l'univers spatial doit avoir nécessairement des bornes et être de grandeur finie, grandeur qui est déterminée par la valeur de cette densité moyenne.

Si nous considérons le champ de gravitation et le champ électromagnétique du point de vue de l'hypothèse de l'éther, il existe en principe entre les deux une différence notable. Aucun espace, et aussi aucune partie d'espace, sans potentiels de gravitation, car ceux-ci lui confèrent ses propriétés métriques, sans lesquelles il ne pourrait en aucune façon être conçu. L'existence du champ de gravitation est intimement liée à l'existence de l'espace. On peut, par contre, très bien imaginer une partie de l'espace sans champ électromagnétique. Le champ électromagnétique, à l'opposé du champ de gravitation, ne semble par conséquent être lié à l'éther que d'une façon accessoire, pour ainsi dire, étant donné que la nature formelle du champ électromagnétique n'est encore nullement déterminée par celle de l'éther gravitatif. D'après l'état actuel de la théorie, on dirait que le champ électromagnétique est basé, par rapport au champ de gravitation, sur un motif formel complètement nouveau, et que la nature, au lieu de douer l'éther gravitatif de champs du type électromagnétique, aurait aussi bien pu le douer de champs d'un type tout à fait différent, par exemple, de champs d'un potentiel scalaire.

Et comme, d'après nos conceptions actuelles, les particules élémentaires de la matière ne sont autre chose dans leur essence que des condensations du champ électromagnétique, notre représentation actuelle du monde reconnaît deux réalités, qui, tout en étant liées par la connexion causale, sont logiquement complètement séparées l'une de l'autre : ce sont

l'éther gravitatif et le champ électromagnétique, ou, comme on pourrait les appeler encore, *espace* et *matière*.

Ce serait naturellement un progrès bien considérable, si l'on réussissait à réunir en une représentation unique le champ de gravitation et le champ électromagnétique. C'est alors seulement que l'ère de la Physique mathématique, inaugurée par Faraday et Maxwell, aboutirait à un résultat satisfaisant. Alors l'opposition *éther-matière* s'évanouirait et toute la physique représenterait le même système cohérent d'idées que la géométrie, la cinématique et la théorie de la gravitation, au moyen de la théorie de la relativité générale. Un essai extrêmement ingénieux a été tenté dans ce sens par le mathématicien H. Weyl; je ne crois pas cependant que sa théorie puisse se maintenir en face de la réalité. Nous ne devons pas en outre, en pensant au proche avenir de la Physique mathématique, écarter sans autre façon la possibilité que les faits accumulés par la théorie des quanta pourraient dresser, devant la théorie des champs, des limites infranchissables.

En résumant, nous pouvons dire : D'après la théorie de la relativité générale, l'espace est doué de propriétés physiques; dans ce sens par conséquent un éther existe. Selon la théorie de la relativité générale un espace sans éther est inconcevable, car non seulement la propagation de la lumière y serait impossible, il n'y aurait même aucune possibilité d'existence pour les règles de mesure et les horloges, et par conséquent aussi pour les distances spatio-temporelles dans le sens de la physique. Cet éther ne doit cependant pas être conçu comme étant doué de la propriété qui caractérise les milieux pondérables, c'est-à-dire comme constitué de parties pouvant être suivies dans le temps : la notion de mouvement ne doit pas lui être appliquée.

---