

LA RELATIVITÉ RESTREINTE LE ROLE CRÉATEUR D'EINSTEIN

Jean NOUET

Université du Maine - Le Mans

La compréhension de la démarche heuristique qui conduisit Einstein à poser les bases de la relativité restreinte nécessite de rappeler, en début d'exposé, quelques éléments significatifs de sa biographie puis de situer l'état d'avancement et les contradictions de la physique classique quand il écrivit son célèbre article de 1905 : "Sur l'électrodynamique des corps en mouvement". La suite de l'exposé a un caractère plus didactique, elle a pour but de montrer l'originalité et la richesse de l'article à travers l'analyse des méthodes utilisées, des résultats obtenus et de leur incidence sur la Physique du XX^{ème} siècle.

QUELQUES ELEMENTS BIOGRAPHIQUES

Einstein a 26 ans en 1905, il occupe alors un poste d'Expert Technique au Bureau des Brevets à Berne. Bien qu'à l'écart de la communauté universitaire, il a déjà à son actif plusieurs articles. Le premier, sur la capillarité, paraît en 1901 dans la revue scientifique allemande *Annalen der Physik*. Entre 1902 et 1904, il publie dans la même revue trois articles de thermodynamique qui témoignent d'une compréhension approfondie de la thermodynamique et de ses aspects statistiques.

Sa méthode de travail est celle d'un autodidacte. Etudiant en

mathématiques et en physique au Polytechnicum de Zurich de 1896 à 1900, il préfère aux cours magistraux la lecture solitaire d'œuvres originales telles que la Théorie Electromagnétique de Maxwell ou le Traité de Mécanique de Mach dont il reconnaîtra plus tard le rôle décisif dans la genèse de sa théorie de la relativité restreinte. Les relations plutôt tendues qu'il entretient avec ses professeurs ne lui permettront pas d'obtenir un poste d'assistant. Il manifeste alors une certaine hostilité vis à vis de l'Université dont l'enseignement repose trop souvent selon lui sur la mémorisation de connaissances rarement remises en question.

Il faudra attendre Juin 1902 pour qu'il obtienne à Berne un emploi permanent au Bureau des Brevets : " Son rôle était de présenter clairement les demandes et de dégager l'idée centrale à partir des explications souvent vagues et verbeuses des inventeurs. C'est peut-être cette formation qui a développé en lui cette faculté exceptionnelle de saisir l'essentiel des problèmes et de voir immédiatement les conséquences d'une hypothèse. Qui plus est, ce travail lui laissait du temps libre pour poursuivre ses recherches. On pourrait dire qu'à ce stade de sa carrière, c'était l'emploi idéal." Extrait de " *Einstein : the man and his achievement* " de G. J. Whitrow.

Au cours de ces années, il tisse des liens d'amitié durables : à l'Université, avec Marcel Grossmann dont les notes de cours lui permettront de préparer son examen terminal et à Berne, avec Maurice Solovine, Konrad Habicht et Michele Besso. Banesh Hoffmann évoque très bien dans son livre "*Albert Einstein : créateur et rebelle*" l'importance de l'environnement intellectuel qu'il trouve auprès de ses amis de Berne. Il écrit en particulier à propos de Michele Besso qu'Einstein remercie à la fin de l'article de 1905 : "Par son attitude délibérément critique, Besso aida Einstein à affiner et à préciser ses notions, ce qui ne l'empêcha pas de se montrer plus qu'encourageant : enthousiaste. Ce rôle de pierre à aiguiser l'esprit, il le joua à merveille pour Einstein."

Dans ces conditions Einstein annonce, au printemps 1905, dans une lettre à son ami Habicht, quatre articles qui vont faire de l'année 1905 une année mémorable dans les annales de la physique. Trois de ces articles

paraîtront dans le tome 17 de *Annalen der Physik* et le quatrième , sur la détermination du nombre d'Avogadro à partir de solutions liquides , sera présenté comme thèse devant l'Université de Zurich. Outre l'article fondamental sur la relativité, le tome 17 contient deux autres articles importants, l'un sur le mouvement Brownien et l'autre, pour lequel lui sera attribué le prix Nobel en 1922, sur l'introduction du concept de quantum d'énergie.

Le génie créateur d'Einstein s'est incontestablement épanoui pendant son séjour à Berne, mais cette production exceptionnelle est en fait l'aboutissement d'une longue période de réflexion et de mûrissement qu'Einstein lui même fait remonter dans ses notes autobiographiques à l'âge de 16 ans. Il essayait alors d'imaginer qu'il poursuivait à la vitesse de la lumière un rayon lumineux en se demandant quelle pouvait être l'apparence de la vibration lumineuse associée . Il écrira que cette interrogation « contenait en germe la théorie de la relativité restreinte ». La faculté d'opérer sur des images mentales est une des caractéristiques de la pensée d' Einstein, il aura fréquemment recours dans sa démarche scientifique à ce qu'il appelait des expériences par la pensée (Gedankenexperiments).

L'analyse de l'article de 1905, qui marque la naissance de la relativité restreinte et bouscule la physique classique, passe par un examen attentif de l'état des connaissances et des difficultés rencontrées dans les principaux domaines de la physique : mécanique, optique, électromagnétisme.

<p>LES SUCCES ET LES CONTRADICTIONS DE LA PHYSIQUE CLASSIQUE</p>
--

LA MECANIQUE :

LE PRINCIPE DE RELATIVITE DE GALILEE, L'ESPACE
ET LE TEMPS ABSOLU DE NEWTON

Galilée introduit l'idée de relativité dans son *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du Monde* qui paraît en 1632 . Cet

ouvrage inspira fortement Newton qui , dans les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* achevé en 1687 , énonce le Principe de relativité sous la forme d'un unique corollaire :

« Les mouvements relatifs des corps enfermés dans un espace quelconque sont les mêmes, que cet espace soit immobile ou qu'il se meuve uniformément et en ligne droite sans rotation . » (Cinquième corollaire de Newton déduit des quatre lois principales).

Ce corollaire permet de définir une classe de référentiels équivalents appelés de nos jours référentiels galiléens . Ainsi dans le cadre d'une présentation moderne on peut , afin de faciliter l'introduction ultérieure de la transformation spéciale de Lorentz , poser le problème de la description du mouvement d'un point matériel M dans deux référentiels galiléens particuliers (R) et (R') définis de la façon suivante :

Les coordonnées du point M sont respectivement (x, y, z) dans (R) et (x', y', z') dans (R') , les axes de (R') étant parallèles aux axes de (R) . Dans cette description où le temps est une grandeur universelle indépendante du référentiel choisi (temps absolu) nous considérons que le mouvement de (R') par rapport à (R) se fait à la vitesse \vec{v} , vecteur constant dirigé suivant l'axe Ox, et qu'au temps t = 0 les origines coïncident.

Nous appellerons transformation de Galilée l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer les coordonnées du point M dans (R') en fonction de ses coordonnées dans (R), voir figure 1 .

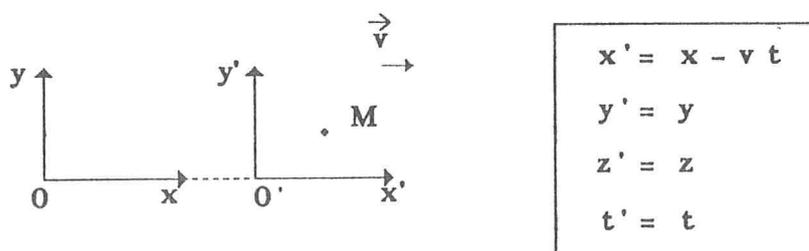


Figure 1. Transformation de Galilée

Si \vec{V} est la vitesse du point M relativement à (R) et \vec{V}' la vitesse de ce même point relativement à (R'), on peut déduire de la transformation de

Galilée la formule de composition des vitesses :

$$\vec{V}' = \vec{V} - \vec{v}$$

Le calcul des accélérations \vec{a} et \vec{a}' du point M relativement à (R) et (R') conduit à l'invariance de l'accélération puisque \vec{v} est un vecteur constant.

$$\vec{a} = \vec{a}'$$

La masse étant un scalaire invariant, l'invariance de l'accélération entraîne nécessairement celle de la force.

$$\vec{a} = \vec{a}' \qquad \vec{f} = m \vec{a} = m \vec{a}' = \vec{f}'$$

L'équation fondamentale de la dynamique prend la même forme dans les deux référentiels. Elle est dite invariante dans un changement de référentiel galiléen.

$$\vec{f} = m \vec{a} \quad \text{dans (R)}, \qquad \vec{f}' = m \vec{a}' \quad \text{dans (R')}$$

Il s'agit d'une autre formulation du principe de relativité de Galilée et Newton. On peut d'ailleurs également énoncer qu'il ne sera jamais possible de mettre en évidence, par une expérience de mécanique, le mouvement d'un référentiel galiléen par rapport à un autre référentiel galiléen, c'est à dire que tous ces référentiels sont équivalents au sens de la mécanique.

Malgré tout, Newton postule l'existence d'un espace absolu qui va, avec la notion de temps absolu, constituer un des concepts fondamentaux de la mécanique classique. Notons à ce propos que des critiques sont déjà formulées à l'époque de Newton — débat opposant Huygens et Leibniz — sur le concept d'espace absolu incompatible avec le principe de relativité de Galilée. Pour une analyse plus complète des apports respectifs de Galilée et de Newton à la cinématique et à la dynamique classique, on pourra se reporter au livre

de Françoise Balibar dans la collection Philosophies : « Galilée, Newton lus par Einstein ».

L'OPTIQUE :
LA MESURE DU MOUVEMENT ABSOLU DE LA TERRE
LE CONCEPT D'ETHER

Parmi tous les référentiels galiléens la mécanique newtonienne privilégie le référentiel de Copernic qui est censé définir un référentiel absolu auquel est associé l'éther immobile de la théorie ondulatoire d'Huygens (voir encadrés 1 et 2).

Par rapport à ce référentiel de Copernic, un laboratoire terrestre peut être considéré, pendant une durée d'expérience très courte, comme un référentiel galiléen en translation à la vitesse $v = 30 \text{ km s}^{-1}$ (on peut alors négliger le mouvement de rotation de la terre sur elle-même) . Devant l'impossibilité par une expérience de mécanique de différencier ces deux référentiels galiléens, c'est à dire de mettre en évidence le mouvement de la terre par rapport à l'éther, il apparut alors naturel de faire appel à des expériences d'optique et d'astronomie.

Encadré 1

Référentiel de Copernic : référentiel dont l'origine coïncide avec le centre de masse du système solaire et dont les axes pointent vers trois étoiles fixes.

La première détermination de la vitesse de la lumière avait été faite par l'astronome danois Römer, en 1615, à partir du mouvement des satellites de Jupiter. Signalons déjà que la valeur très grande mais finie de c ($c \approx 300\,000 \text{ km s}^{-1}$), remet-

tait en cause l'idée de propagation instantanée des interactions à distance et allait rendre nécessaire l'élaboration de nouvelles théories, la théorie de Maxwell d'abord, celle d'Einstein ensuite .

Dans le référentiel de Copernic, homogène et isotrope, la vitesse de la lumière est la même quelle que soit sa direction de propagation, nous

noterons \vec{c} le vecteur vitesse de la lumière dans ce référentiel. L'application de la formule de composition des vitesses de la mécanique newtonienne permet de déduire le vecteur vitesse correspondant \vec{c}' dans un référentiel galiléen

terrestre se traduisant à la vitesse constante \vec{v} pendant la durée de l'expérience envisagée ($v = \|\vec{v}\| \approx 30 \text{ km s}^{-1}$) :

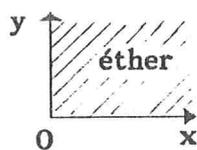
$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v} .$$

En langage moderne nous dirons que, dans le cadre des prévisions de la mécanique, il y a brisure de symétrie, c'est à dire qu'on s'attend à trouver des valeurs différentes pour la valeur de la vitesse de la lumière selon sa direction de propagation dans le laboratoire. La figure 2 montre quelques trajets de rayons particuliers qui, par exemple, jouent un rôle dans la célèbre

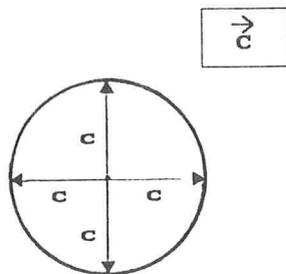
Encadré 2

Ether - Ether cosmique - Ether luminifère : le terme d'éther, emprunté à la science grecque, a été introduit par Descartes dans le cadre de sa conception mécaniste de l'Univers. Il décrit un milieu hypothétique remplissant l'espace interplanétaire. Par analogie avec les ondes élastiques qui nécessitent un milieu matériel, dans la logique de la théorie ondulatoire d'Huygens, l'éther devient le milieu jugé alors indispensable à la propagation des ondes lumineuses.

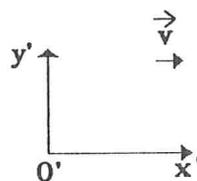
expérience de Michelson - Morley.



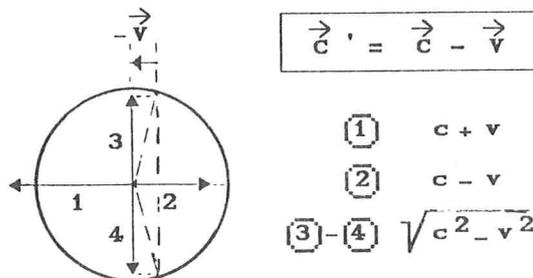
Référentiel de Copernic



Isotropie



Référentiel terrestre



Brisure de symétrie

Figure 2. Prévisions de la mécanique newtonienne

Sur la base d'une telle conception, les expérimentateurs conçurent d'ingénieuses expériences d'optique pour déceler le mouvement absolu de la terre, c'est à dire son mouvement par rapport à l'éther immobile. Ainsi l'expérience d'Arago (1810) avait-elle pour but de mettre en évidence la variation de vitesse des rayons lumineux émis par deux étoiles situées dans la direction du mouvement de la terre (figure 3) et repérées à douze heures d'intervalle (T entre E_1 et E_2). Des rayons lumineux de vitesses différentes

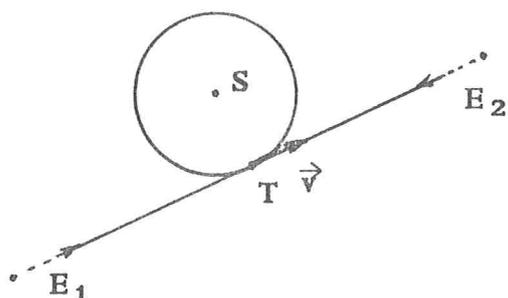


Figure 3. Expérience d'Arago

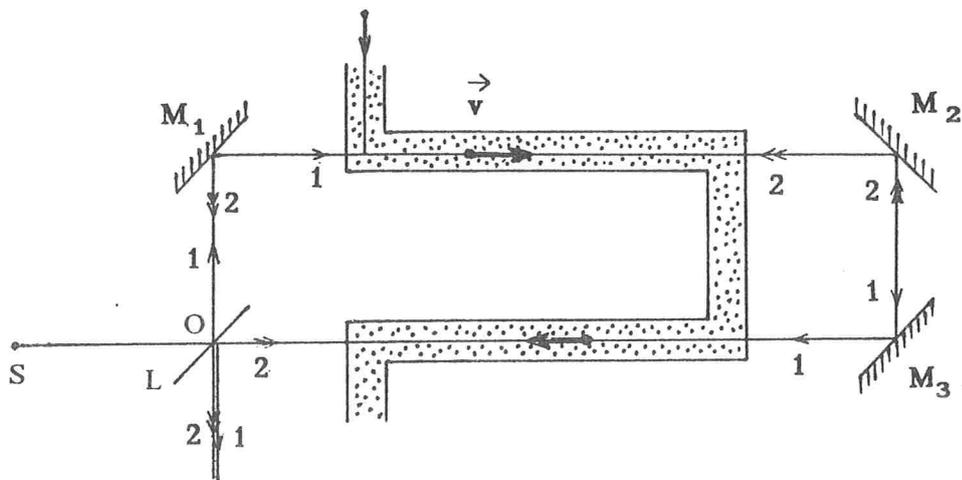
subissant des déviations différentes à la traversée d'un prisme, l'écart attendu sur l'angle de déviation devait être proportionnel au rapport v/c c'est à dire de l'ordre de 10^{-4} . Il n'en fut rien et Fresnel, pour interpréter cette expérience négative, proposa une théorie qui reposait sur la notion d'entraînement partiel

de l'éther par la terre en mouvement. Il introduisit un coefficient d'entraînement k tel que $k = 1 - 1/n^2$ où n est l'indice du corps en mouvement dans l'éther. Cette théorie de Fresnel (1818) allait connaître une longue existence avec quelques succès marquants, comme l'interprétation des résultats de l'expérience de Fizeau (1851) sur la mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau en mouvement (encadré 3). Toutefois de nombreux faits incompatibles restaient à interpréter comme par exemple l'aberration stellaire (encadré 3) mise en évidence par Bradley (1728) qui, elle, n'était pas conciliable avec un effet d'entraînement de l'éther. Le problème de l'éther devint un problème central en physique qui, sans aucun doute, stimula les travaux de savants illustres sur l'élasticité des milieux continus et sur le développement des méthodes mathématiques nécessaires à ce type d'études. Citons par exemple les travaux de Navier, Cauchy, Poisson, Green, Newmann et Stokes. Le milieu "éther" ne devait-il pas réunir selon les termes de Whittaker dans son *Histoire des théories de l'éther et de l'électricité* les propriétés contradictoires suivantes : "se comporter comme un solide élastique afin de transmettre des vibrations transversales aussi rapides que celles de la lumière" et d'autre part "comme un fluide pour les mouvements

progressifs plus lents des planètes dans l'éther".

Encadré 3

Expérience de Fizeau (1851) : mise en évidence du coefficient d'entraînement de l'éther par l'eau en mouvement à partir du déplacement du système de franges d'interférences quand on inverse le sens d'écoulement de l'eau dans le dispositif représenté ci-dessous.



L'expérience consiste à faire interférer les rayons 1 et 2 obtenus à partir d'un rayon initial SO séparé au niveau de la lame semi-réfléchissante L en deux rayons qui suivent les trajets notés 1 et 2 sur la figure. Les rayons lumineux se propagent dans un tube rempli d'eau qui est en mouvement à la vitesse v par rapport au référentiel du laboratoire. L'expérience révèle que la vitesse de la lumière par rapport au laboratoire peut s'exprimer sous la forme :

$$V = c/n + k v$$

où c/n est la vitesse de la lumière dans l'eau (n indice de l'eau, $n \approx 4/3$). La valeur trouvée du coefficient k est compatible avec le coefficient d'entraînement de l'éther $k = 1 - 1/n^2$ introduit par Fresnel.

Aberration stellaire (1728) découverte par Bradley : observation du mouvement apparent elliptique des étoiles sur la voûte céleste.

L' ELECTROMAGNETISME DE MAXWELL

Si le concept d' éther a sans aucun doute posé de nombreux problèmes pour l' interprétation simultanée des expériences que nous venons d' évoquer, il a permis à Maxwell de se dégager des théories newtoniennes de l' électricité et du magnétisme, c' est à dire d' abandonner la notion d' action instantanée à distance pour approfondir la notion de propagation du champ électromagnétique à travers un milieu. En s' appuyant sur les idées de Faraday (1831) et de Thomson (1850), Maxwell a utilisé une représentation mécaniste d' un éther cellulaire électrique - qu' il identifia à l' éther de l' optique - pour introduire les notions de courant de déplacement et de propagation de proche en proche du champ électromagnétique (figure 4).

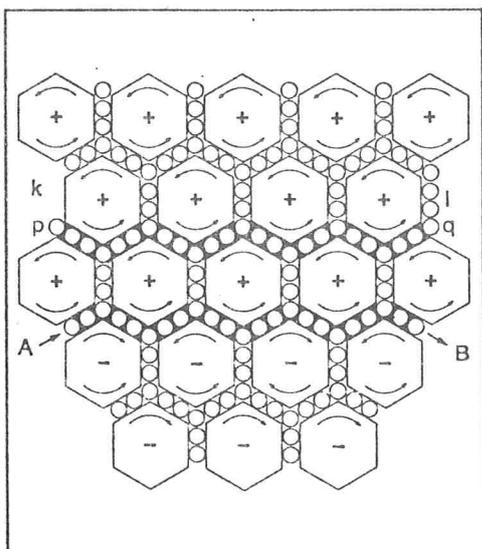


Figure 4 . Image de l' éther cellulaire .
 Les hexagones sont des molécules d' éther dont la rotation engendre le magnétisme .
 Les billes interstitielles représentent l' électricité . Il s' agit là d' une image guide plutôt que d' un modèle explicatif .
 (d' après Maxwell , Scientific papers .
 Cliché J. L. Charmet)

Il fut ainsi conduit à établir les équations générales de l' électromagnétisme (1861 - 1862) que nous donnerons sous leur forme " actuelle " dans le cas du vide caractérisé par les constantes universelles ϵ_0 et μ_0 du système d' unités international (S. I.).

$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$	$\text{rot } \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$
$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (3)$	$\text{div } \vec{E} = 0 \quad (4)$

L'application de l'opérateur rotationnel respectivement aux équations (1) et (2) conduit, en tenant compte des équations (3) et (4), aux équations de propagation des champs \vec{E} et \vec{B} à la vitesse c qui est ainsi une constante universelle dépendant des caractéristiques ϵ_0 et μ_0 du vide .

$$\begin{array}{l} \Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0} \\ \Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0} \end{array} \quad \text{avec} \quad c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$$

La théorie de Maxwell fait apparaître les rôles symétriques joués par les vecteurs \vec{E} et \vec{B} qui constituent le champ électromagnétique (\vec{E} , \vec{B}) se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière . Il s'agit de la deuxième grande théorie unificatrice de la physique après celle de Newton . Encore faudra-t-il, pour la consécration de cette théorie, attendre les travaux de Hertz, en 1888, qui montrèrent véritablement l'identité des ondes "hertziennes" et des ondes lumineuses .

Toutefois, une des faiblesses de la théorie de Maxwell n'allait pas échapper à Einstein . En effet, pour prendre en compte tous les phénomènes connus de la physique du dix neuvième siècle, il est nécessaire d'adjoindre à ces équations l'expression de la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

qui suppose l'existence d'un champ "électromoteur" \vec{E}_m ($\vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B}$) ajouté de façon arbitraire pour rendre compte de la force appliquée sur une charge électrique unité en mouvement à la vitesse \vec{v} dans une induction magnétique \vec{B} .

L' EXPERIENCE DE MICHELSON - MORLEY ET LA THEORIE DE LORENTZ

La formulation générale des lois de l'électromagnétisme n'allait pas conduire pour autant Maxwell à abandonner la notion d'éther . Les équations

que nous venons de présenter avec notre état d'esprit de la fin du vingtième siècle sont censées, pour Maxwell, être écrites dans un référentiel absolu, celui de Copernic auquel est lié l'éther immobile déjà évoqué. Ainsi Maxwell contribua - t - il à stimuler les travaux d'expérimentateurs comme Michelson qui se proposa de déterminer par une méthode interférométrique la vitesse de déplacement de la terre par rapport à l'éther immobile. Cette expérience réalisée d'abord en 1881, puis améliorée avec la participation de Morley en 1887, fut un échec. Pour une présentation complète de l'expérience on pourra se reporter aux manuels de premier cycle des Universités. Son résultat négatif remettait en question l'interprétation de l'aberration stellaire donnée par Fresnel, autrement dit, portait un coup à la théorie de Fresnel.

Dans cette expérience de Michelson et Morley il ne pouvait y avoir aucun doute quant à l'interprétation puisque la source lumineuse appartient alors au référentiel du laboratoire contrairement à la situation rencontrée dans les expériences d'astronomie de Bradley et d'Arago. D'autre part, il s'agissait d'une expérience très précise qui devait permettre de déceler des effets de l'ordre de v/c . Dans les vingt années qui suivirent la découverte du résultat négatif des expériences de Michelson et Morley, les physiciens rivalisèrent d'imagination afin de proposer une interprétation de ce résultat qui préservât la théorie de Fresnel. En particulier, dès 1882, indépendamment l'un de l'autre et à cinq mois d'intervalle, Fitzgerald puis Lorentz introduisirent l'hypothèse de contraction des corps en mouvement à travers l'éther dans la direction du mouvement. Le facteur de contraction introduit ($\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$) devait exactement compenser la différence de vitesse prévue par la physique classique entre les rayons lumineux, suivant que les trajets sont parallèles ou orthogonaux à la vitesse \vec{v} de translation de la terre par rapport à l'éther. L'introduction très formelle de cette hypothèse eut ses adeptes mais signalons que Poincaré fut le premier à critiquer cette approche très fragmentaire du problème.

Alors que Lorentz avait proposé avec succès un perfectionnement de la théorie électromagnétique de Maxwell qui permettait d'interpréter la formule de Fresnel donnant le coefficient d'entraînement k , il publia en 1895 une étude dans l'esprit de la théorie de la relativité qui mérite de retenir l'attention afin de bien situer la contribution ultérieure d'Einstein. Dans ce travail

Lorentz se proposait d'étudier l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes électriques et optiques. Ainsi, afin d'obtenir la même formulation des équations de Maxwell, au second ordre près en v/c , dans un référentiel terrestre et dans un référentiel absolu lié à l'éther, il introduisit une transformation du temps de la forme $t' = t - \frac{v \cdot x}{c^2}$. Lorentz ne prêtait aucune signification au paramètre t' qu'il appelait alors le temps local. Indiquons tout de suite qu'il précisera plus tard, en 1927 : « je n' avais jamais pensé que ce paramètre t' pût avoir une quelconque relation avec le temps réel » et plus loin « je n'ai considéré ma transformation du temps que comme une hypothèse de travail de caractère heuristique, la théorie de la relativité est donc réellement l'œuvre d'Einstein » (citation extraite de W. G. Rosser " Une introduction à la théorie de la relativité "). La transformation ainsi établie par Lorentz fut modifiée en 1898 par Larmor qui introduisit le coefficient multiplicatif γ (figure 5) et constata l'analogie de ce coefficient avec le facteur de contraction de Lorentz -Fitzgerald . La forme définitive de la transformation fut donnée dans l'article de Lorentz de 1904 (Gerald Holton, 1960). Cette transformation qui assure l'invariance des équations de Maxwell fut appelée en 1905 par Poincaré "transformation de Lorentz" (figure 5).

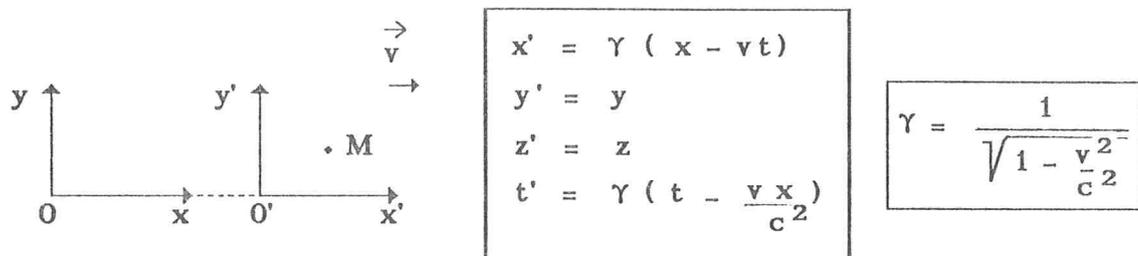


Figure 5 . Transformation de Lorentz

Pour achever cette présentation de l'état d'avancement de la physique à la fin du dix neuvième siècle on ne peut manquer d'évoquer les travaux de Poincaré qui dès 1895, avait trouvé, comme nous l'avons déjà vu, peu satisfaisantes les explications proposées à l'époque. Il en vint donc à énoncer en 1904 le principe de relativité sous la forme suivante: « les lois de la physique doivent être les mêmes pour un observateur au repos ou pour un observateur en mouvement uniforme de translation, de sorte que nous n' avons aucun moyen de

savoir si nous sommes en repos ou en mouvement». Mais comme le soulignent Gerald Holton (1960) et Stanley Goldberg (1967), pour Poincaré le principe de relativité est un fait déduit de l'expérience de Michelson-Morley qui pourrait éventuellement être remis en question par de nouveaux faits expérimentaux. Poincaré ne cherchait pas à développer une théorie basée sur le principe de relativité. Comme Lorentz, il cherchait une théorie des électrons qui puisse expliquer le comportement de la matière et son interaction avec l'éther. Cette approche est foncièrement différente de celle d'Einstein, comme nous allons le voir à partir de l'analyse de l'article que nous présentons maintenant.

L'ARTICLE D' EINSTEIN DE 1905 : LA NAISSANCE
DE LA RELATIVITE RESTREINTE

L'article est construit en deux parties précédées d'une *introduction* qui, dès le départ, invite à une réflexion sur l'Electromagnétisme de Maxwell.

L'INTRODUCTION DE L'ARTICLE DE 1905

Sans surprise pour le lecteur, compte tenu du titre *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*, Einstein s'intéresse d'abord au phénomène d'induction dans le cas du mouvement relatif d'une spire et d'un aimant. Il fait remarquer que l'explication donnée pour justifier l'apparition d'un courant induit dans la spire, au cours du mouvement relatif spire-aimant, introduit une distinction arbitraire entre repos et mouvement.

Bien qu'aucune formulation mathématique n'apparaisse dans l'*introduction*, pour développer la présentation de l'exemple choisi nous ferons appel à la notation vectorielle utilisée de nos jours. Dans la première hypothèse, déplacement de l'aimant par rapport à la spire au repos, le champ magnétique créé par l'aimant en mouvement dans le référentiel de la spire dépend de l'espace et du temps, nous le noterons $\vec{B}(\vec{r}, t)$. L'équation de Maxwell-Faraday $\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ impose donc l'existence d'un champ électrique en tout point du référentiel. En particulier, ce champ électrique met en mouvement les

électrons du métal de la spire produisant ainsi le courant induit (figure 6 . a). Dans la deuxième hypothèse, déplacement de la spire par rapport à l'aimant au repos, le champ magnétique créé par l'aimant est dans le référentiel de l'aimant indépendant du temps (magnétostatique), il peut s'écrire $\vec{B}(\vec{r})$ et dans ce référentiel il n'existe pas de champ électrique associé. Pour justifier l'apparition du courant dans la spire on peut alors faire appel à la notion de force électromotrice induite (loi de Faraday) ou à la notion de champ électromoteur que nous avons déjà évoquée (figure 6 . b).

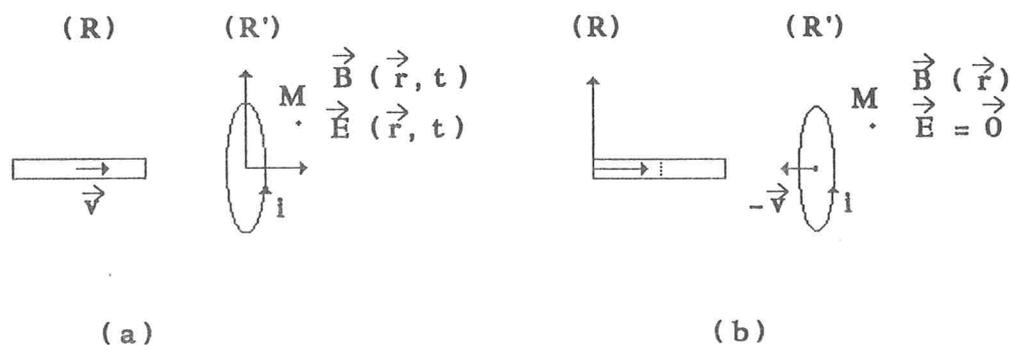


Figure 6. Déplacement relatif spire - aimant

Einstein est frappé par l'asymétrie qui existe entre les deux explications proposées alors qu'il s'agit de rendre compte d'un unique phénomène. Nous verrons comment dans la deuxième partie de l'article il répond à ce problème en établissant une loi de transformation des champs dans un changement de référentiel galiléen.

Cette première partie de l' *introduction* conduit à un paragraphe essentiel que nous transcrivons intégralement : « Des exemples du même genre, ainsi que les expériences entreprises pour démontrer le mouvement de la Terre par rapport au "milieu où se propage la lumière" et dont les résultats furent négatifs, font naître la conjecture que ce n'est pas seulement dans la mécanique qu'aucune propriété des phénomènes ne correspond à la notion de mouvement absolu, mais aussi dans l'électrodynamique. Pour tous les systèmes de coordonnées pour lesquels les équations de la mécanique restent valables, les lois de l'électrodynamique et de l'optique gardent également leur formulation; c'est ce qui a été démontré pour les grandeurs du premier ordre. ».

Plusieurs idées sont exprimées qui n'ont pourtant pas été admises pendant quelques décennies par d'illustres scientifiques, philosophes ou historiens

des sciences : d'abord qu'un ensemble de faits expérimentaux et de travaux antérieurs ainsi qu'une réflexion personnelle ont conduit Einstein à étendre le principe de relativité de Galilée à tous les phénomènes physiques ; ensuite que si les travaux publiés par Lorentz en 1895 étaient connus d'Einstein - allusion contenue dans la dernière phrase qui évoque la transformation de "Lorentz" démontrée au premier ordre seulement - en revanche il ne connaissait pas l'article de Lorentz de 1905 ce qu'a très bien prouvé G. Holton (Sur les origines de la théorie spéciale de la relativité - 1960).

Nous retiendrons que l'expérience de Michelson-Morley n'a pas eu le rôle déterminant qu'on lui a trop souvent attribué pour des raisons historiques, scientifiques et aussi pédagogiques, raisons très bien analysées dans un autre article de G. Holton (Einstein et l'expérience "cruciale" - 1969). Son influence a été indirecte dans la mesure où elle a incontestablement suscité les travaux de Lorentz, mais dans la réflexion d'Einstein elle n'a pas été plus décisive que l'expérience de Fizeau ou que les observations relatives à l'aberration stellaire. Un doute subsiste d'ailleurs puisqu' Einstein écrit dans un passage d'une lettre de 1954 transcrite par S. Bergia (1979) : « Le résultat de l'expérience de Michelson n'a pas exercé d'influence considérable sur mon propre travail. Je ne me souviens même pas si je le connaissais seulement lorsque j'écrivis mon premier article sur ce sujet. ».

Alors que Poincaré voyait dans le " principe de relativité " un fait déduit de l'expérience, Einstein donne à la conjecture précédemment énoncée le statut de Principe. Il y ajoute un second Principe « en apparence seulement incompatible avec le premier » celui de la constance de la lumière dans le vide quelque soit le référentiel galiléen choisi (figure 7). L' expression " en apparence seulement "

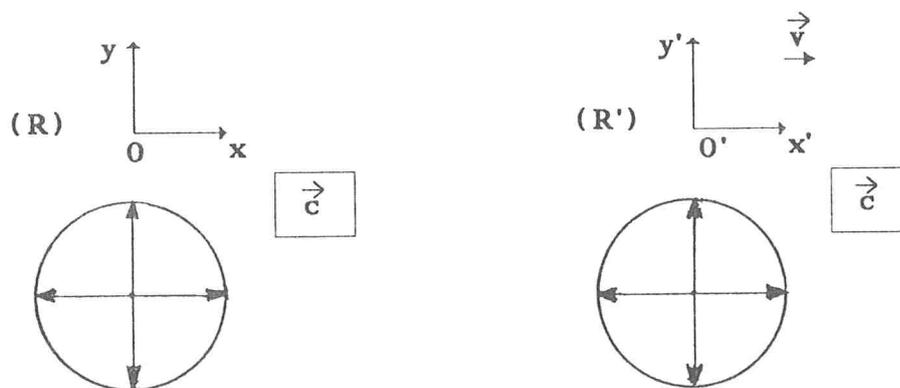


Figure 7 . Invariance de la vitesse de la lumière dans le vide

intrigue le lecteur mais elle annonce déjà que l'auteur s'engage dans une voie totalement nouvelle. En effet, l'application de la transformation de Galilée implique une modification de la vitesse de la lumière dans un changement de référentiel (figure 2). Nous verrons comment cette transformation devra être abandonnée, l'idée de base d'Einstein consistant à accepter et exploiter les conséquences logiques de ces deux principes.

En ce qui concerne le concept d'éther, vieux de plus de deux siècles, il est écarté d'une simple phrase : « On montrera que l'introduction d'un "éther luminifère" devient superflue dans la mesure où le point de vue développé ici ne requiert pas un "espace absolu au repos" pourvu de propriétés particulières ».

L'introduction se termine par un dernier paragraphe qui annonce la mise en place de la nouvelle théorie grâce à l'utilisation de processus électromagnétiques pour relier les notions physiques d'espace et de temps.

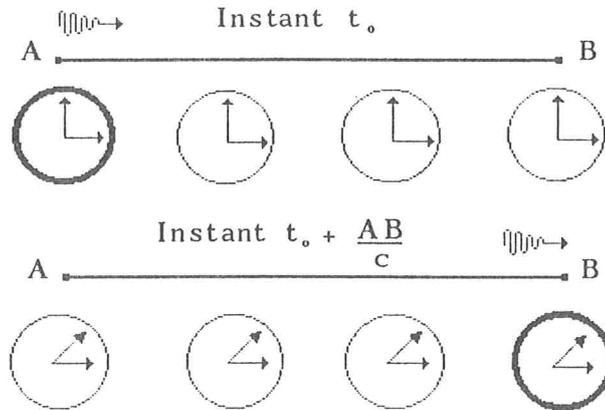
LA PARTIE CINEMATIQUE DE L'ARTICLE DE 1905

D'emblée Einstein remet en question toutes les notions non solidement établies nécessaires à l'élaboration de la cinématique. Il s'appuie pour cela sur des bases simples et précises suggérées par l'évidence expérimentale. Ainsi fait-il remarquer que la mesure du "temps" se ramène toujours à la constatation de la simultanéité de deux événements en un même point de l'espace. Les difficultés surgissent quand il s'agit de définir la simultanéité en des points différents puisqu'il n'existe pas de signaux se propageant instantanément. L'idée de base va consister à exploiter judicieusement le deuxième principe énoncé qui impose la constance de la lumière dans le vide pour tous les référentiels galiléens. Einstein introduit un procédé de mesure utilisant des signaux lumineux, il s'agit d'une "expérience par la pensée" permettant de synchroniser des horloges au repos en des endroits différents d'un même référentiel (encadré 4).

La présentation que nous donnons maintenant pour illustrer le caractère non absolu de la simultanéité de deux événements n'est pas exactement celle de l'article de 1905 mais Einstein préféra ultérieurement cette présentation pour montrer, sans formalisme mathématique, la nécessité de renoncer au concept de temps absolu.

Encadré 4

Synchronisation des horloges



Soient deux points A et B fixes par rapport à un même référentiel galiléen (R) et distants de AB. A l'instant t_A indiqué par une horloge placée en A un signal lumineux est émis en direction d'une horloge placée en B, cette horloge est synchronisée avec la première si, quelque soit t_A , le signal est reçu par l'horloge placée en B au temps t_B tel que $t_B = t_A + \frac{AB}{c}$

Expérience par la pensée illustrant le caractère relatif de la simultanéité

Si deux événements se produisent en deux points M_1 et M_2 d'un même référentiel (R), il sera aisé pour un observateur placé en H, milieu de $[M_1M_2]$, de contrôler la simultanéité des deux événements. En effet, toutes les horloges du référentiel (R) ayant été synchronisées (en utilisant la procédure de l'encadré 4), on dira que les deux événements (E_1) et (E_2) se produisant aux instants t_1 et t_2 aux points M_1 et M_2 sont simultanés si deux signaux lumineux α_1 et α_2 émis respectivement aux points M_1 et M_2 aux instants t_1 et t_2 arrivent au même instant en H (encadré 5).

La procédure ainsi définie permet de vérifier que dans le référentiel (R) les événements (E_1) et (E_2) sont simultanés. Nous allons voir qu'il n'en

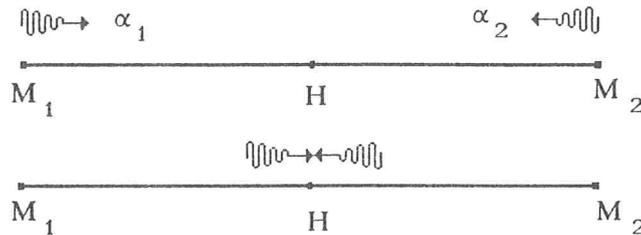
est plus de même pour un observateur - placé dans des conditions apparemment équivalentes - appartenant à un référentiel galiléen (R') en translation à la vitesse \vec{v} parallèlement à la direction de la droite (M₁ M₂).

Encadré 5

Notion de simultanéité

Evénement (E₁)
en M₁ à t₁

Evénement (E₂)
en M₂ à t₂



Les signaux α₁ et α₂ sont émis aux instants t₁ et t₂. L'observateur placé en H reçoit les deux signaux lumineux au même instant t_H.

$$t_H = t_1 + \frac{M_1 H}{c} = t_2 + \frac{M_2 H}{c}$$

Comme $\frac{M_1 H}{c} = \frac{M_2 H}{c}$ nous déduisons $t_1 = t_2$

Les deux événements sont simultanés dans (R)

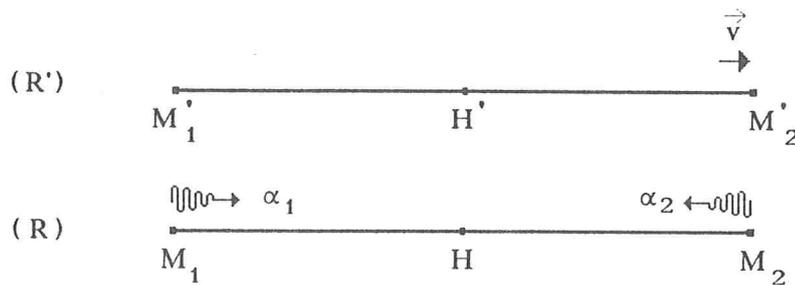
Considérons pour cela dans le référentiel (R') les points M'₁, M'₂ et H' homologues des points M₁, M₂ et H dans (R) (encadré 6). Supposons qu'à l'instant t₁, égal à t₂, dans (R) où se produisent les événements (E₁) et (E₂) les points homologues de (R) et de (R') coïncident et qu'un observateur de (R') soit placé au point H' milieu de M'₁ M'₂. On peut illustrer cette représentation comme le faisait Einstein en considérant que l'observateur en H' est dans un train "relativiste" alors que l'observateur situé en H est sur le quai de gare où passe le train imaginaire.

Les éclairs lumineux α₁ et α₂ étant émis dans le référentiel (R)

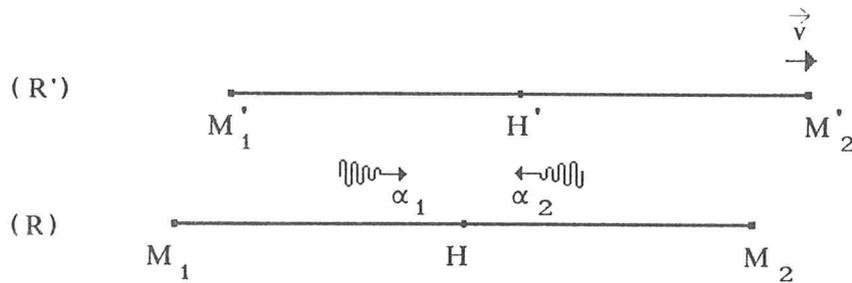
l'observateur placé en H' reçoit le signal lumineux α_2 avant le signal lumineux α_1 puisqu'il va à la rencontre du signal α_2 et fuit le signal α_1 . L'ordre de réception des signaux serait d'ailleurs inversé si le référentiel (R') se déplaçait à la vitesse $-\vec{v}$ par rapport au référentiel (R) , c'est à dire vers la gauche sur la figure.

Encadré 6

Introduction d'un temps relatif à chaque référentiel



Les signaux α_1 et α_2 sont émis aux temps t_1 et t_2 , $t_1 = t_2$. Les événements sont simultanés pour l'observateur situé en H dans (R)



Le signal α_2 atteint l'observateur placé en H' dans (R') avant α_1 .

Comme l'éclair α_1 est reçu après l'éclair α_2 , il est nécessaire d'introduire le temps t' dans (R') , t'_i étant la date d'émission de α_i

dans (R') . Alors $t'_1 + \frac{M'_1 H'}{c} > t'_2 + \frac{M'_2 H'}{c}$

comme $\frac{M'_1 H'}{c} = \frac{M'_2 H'}{c}$ (Principe d'invariance de c)

nous déduisons $t'_1 > t'_2$

Les événements simultanés dans (R) ne sont plus simultanés pour l'observateur situé en H' dans (R') .

Les schémas sont effectués par un observateur appartenant au référentiel (R)

Pour un physicien "pré-relativiste" la non-simultanéité des signaux à la réception serait attribuée à la différence de vitesse des deux signaux lumineux par rapport à l'observateur en mouvement, le module de la vitesse relative étant $c + v$ pour α_2 et $c - v$ pour α_1 . En revanche, pour Einstein, le fait d'avoir retenu le principe de la constance de la lumière dans le vide * quel que soit le référentiel galiléen oblige à introduire un temps t' dans (R') distinct du temps t dans (R) puisque les durées de propagation sont alors égales (encadré 6).

Ayant ainsi défini un procédé de mesure faisant appel à des signaux lumineux, Einstein déduit la première conséquence fondamentale de ses deux principes : le caractère non absolu de la simultanéité ; il est donc conduit à abandonner la notion de temps absolu. Sur les mêmes bases, il présente alors en quelques pages une démonstration rigoureuse des relations de transformation des coordonnées spatio-temporelles d'un événement sous le titre : « Théorie de la transformation des coordonnées spatiales et du temps lorsque l'on passe d'un système au repos à un système animé d'un mouvement de translation uniforme par rapport au premier ». Il s'agit de la transformation de Lorentz qu'il introduit dans une optique complètement différente de celle de Lorentz à partir d'une réflexion originale sur l'espace et le temps.

La transformation de Lorentz

Pour présenter ces relations de transformation nous reviendrons à notre introduction de la transformation de Galilée (figure 1). La représentation d'un événement nécessite maintenant de considérer, en plus des coordonnées cartésiennes (x, y, z), le temps t mesuré par les observateurs du référentiel (R). Le même événement dans le référentiel (R') est alors caractérisé par les coordonnées spatiales (x', y', z') et le temps t' mesuré par les observateurs de (R'). Un événement, noté $\{E\}$, sera de ce fait caractérisé par quatre composantes : $\{x, y, z, t\}$ dans (R) et $\{x', y', z', t'\}$ dans (R') (dans le mémoire d'Einstein ces dernières composantes sont notées $\{\xi, \eta, \zeta, \tau\}$ et la vitesse de la lumière est notée V). Les observateurs de chaque référentiel (R) et (R') sont munis d'horloges qui ont été synchronisées

* Dans toutes les "expériences" considérées, les signaux lumineux sont supposés se propager dans le vide (les propriétés optiques de l'air sont peu différentes de celles du vide).

de telle sorte que $t = t' = 0$ au moment de leur coïncidence spatiale, c'est à dire quand O' est en O (figure 5).

La transformation des coordonnées cartésiennes et du temps étant obtenue, Einstein montre qu'elle satisfait à la relation d'invariance :

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

relation exprimant qu'une onde sphérique émise à l'origine du référentiel au temps $t = 0$ se propage dans le vide à la même vitesse c par rapport à n'importe quel référentiel galiléen.

L'intérêt de cette démonstration de la transformation de Lorentz est qu'elle repose non seulement sur les principes posés mais également sur la définition de méthodes de mesure. Cette approche opérationnaliste est une nouveauté dans la pensée et la démarche scientifique. Einstein donne un sens au mot temps pour un événement éloigné en définissant un procédé de mesure qui fait appel à la propagation de signaux lumineux dans le vide, propagation caractérisée par une constante universelle, la vitesse de la lumière.

Il introduit ensuite les notions de "contraction des longueurs" et de "dilatation du temps" que nous ne développerons pas ici. Un dernier court chapitre intitulé « Théorème de l'addition des vitesses » termine la Partie cinématique de l'article. Einstein y introduit ce que nous appelons maintenant la formule de transformation des vitesses. Si les composantes de la vitesse d'une particule sont respectivement (V_x, V_y, V_z) dans (R) et (V'_x, V'_y, V'_z) dans (R') en mouvement par rapport à (R) à la vitesse \vec{v} (\vec{v} parallèle à Ox), on obtient :

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{V'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} V'_x} \\ V_y &= \frac{\sqrt{1 - \beta^2} V'_y}{1 + \frac{v}{c^2} V'_x} \\ V_z &= \frac{\sqrt{1 - \beta^2} V'_z}{1 + \frac{v}{c^2} V'_x} \end{aligned} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

Formules de transformation des vitesses

A ce stade il est tout à fait surprenant qu' Einstein ne fasse aucune allusion à l'expérience de Fizeau (encadré 3) qu'il aurait pu aisément interpréter* . En effet , si le référentiel (R') est associé au liquide en mouvement à la vitesse \vec{v} parallèle à l'axe Ox du référentiel (R) du laboratoire , la vitesse V_x de la lumière dans le laboratoire peut s'exprimer en fonction de la vitesse de la lumière V'_x , $V'_x = \frac{c}{n}$, dans le liquide (n indice du liquide). On obtient alors dans la présente hypothèse (\vec{v} parallèle à Ox) :

$$V_x = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{c} \frac{c}{n}}$$

On peut développer V_x au premier ordre en $\frac{v}{c}$ puisque la vitesse d'écoulement du fluide est très faible par rapport à la vitesse de la lumière dans le fluide .

$$V_x \approx \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) v \approx \frac{c}{n} + k v$$

On retrouve ici le coefficient k ($k = 1 - \frac{1}{n^2}$) qui correspond au " mystérieux " coefficient d'entraînement partiel de l'éther introduit par Fresnel. L'expérience est interprétable dans le cadre de la nouvelle théorie sans qu'il soit nécessaire de faire appel au concept d'éther.

LA PARTIE ELECTRODYNAMIQUE DE L'ARTICLE DE 1905

Dans cette dernière partie Einstein utilise les résultats qu'il a obtenus dans le domaine de la cinématique et les applique à l'électrodynamique . D'abord il écrit les équations de Maxwell pour le vide dans le référentiel (R), il s'agit de l'expression analytique des équations de Maxwell - Faraday et de Maxwell - Ampère déjà introduites dans la première partie de l'exposé . Nous les écrivons ci - après avec nos notations , alors que les composantes de \vec{E} et \vec{B} sont notées respectivement X, Y, Z et L, M, N dans le mémoire d' Einstein.

* Il semble qu' Einstein ait fait le choix délibéré de ne privilégier et de ne citer aucune expérience célèbre pour appuyer sa théorie dont la cohérence interne lui paraît suffisamment convaincante.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= - \frac{\partial B_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= - \frac{\partial B_y}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= - \frac{\partial B_z}{\partial t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial E_y}{\partial t} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial E_z}{\partial t} \end{aligned}$$

Formulation analytique dans (R) des équations de Maxwell
(équations de Maxwell-Faraday et de Maxwell-Ampère)

En appliquant la transformation de Lorentz inverse aux composantes x, y, z, t dans (R) il obtient des équations où interviennent les composantes x', y', z', t' relatives à (R'). D'après le principe de relativité les équations de Maxwell doivent garder la même formulation dans le référentiel galiléen (R') c'est à dire qu'elles doivent encore s'exprimer dans (R') sous la forme :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E'_z}{\partial y'} - \frac{\partial E'_y}{\partial z'} &= - \frac{\partial B'_x}{\partial t'} \\ \frac{\partial E'_x}{\partial z'} - \frac{\partial E'_z}{\partial x'} &= - \frac{\partial B'_y}{\partial t'} \\ \frac{\partial E'_y}{\partial x'} - \frac{\partial E'_x}{\partial y'} &= - \frac{\partial B'_z}{\partial t'} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B'_z}{\partial y'} - \frac{\partial B'_y}{\partial z'} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial E'_x}{\partial t'} \\ \frac{\partial B'_x}{\partial z'} - \frac{\partial B'_z}{\partial x'} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial E'_y}{\partial t'} \\ \frac{\partial B'_y}{\partial x'} - \frac{\partial B'_x}{\partial y'} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial E'_z}{\partial t'} \end{aligned}$$

Formulation analytique dans (R') des équations de Maxwell

Pour assurer l'identité des deux familles d'équations, les composantes du champ électromagnétique (\vec{E}', \vec{B}') dans (R') doivent, en fonction des composantes du champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) dans (R), avoir pour expression :

$\vec{E} \begin{cases} E_x = E_x \\ E_y = \gamma (E_y - v B_z) \\ E_z = \gamma (E_z + v B_y) \end{cases}$	$\vec{B} \begin{cases} B_x = B_x \\ B_y = \gamma (B_y + \frac{v}{c^2} E_z) \\ B_z = \gamma (B_z - \frac{v}{c^2} E_y) \end{cases}$	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
---	---	---

Formules de transformation des champs électrique et magnétique

On constate qu'en plus du champ électrique \vec{E} existant dans le référentiel (R) il apparaît, dans le référentiel (R') de l'observateur en mouvement, une composante supplémentaire que l'on peut assimiler au champ électromoteur si on néglige les termes du second ordre en v/c . Les expressions des composantes de \vec{E}' deviennent * :

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x \\ E'_y &\approx E_y - v B_z && \text{(au premier ordre)} \\ E'_z &\approx E_z + v B_y && \text{(au premier ordre)} \end{aligned}$$

c'est à dire , sous forme vectorielle :

$$\vec{E}' \approx \vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}$$

Einstein revient alors en quelques lignes sur l'exemple de la spire et de l'aimant évoqué au début de l'article. Il indique seulement, sans plus de développement, que disparaît ainsi l'asymétrie des deux interprétations. En effet, la situation de la figure 6. b devient similaire à la situation de la figure 6. a si le champ électromagnétique est exprimé dans le référentiel de la spire, noté (R'), en mouvement à la vitesse $\vec{v}' = -\vec{v}$, avec $v \ll c$, par rapport au référentiel de l'aimant, noté (R).

$\vec{B} \begin{vmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{vmatrix} \quad \vec{E} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$	$\vec{B}' \begin{vmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{vmatrix} \quad \vec{E}' \begin{vmatrix} E_x = 0 \\ E'_y \approx v B_z \\ E_z \approx -v B_y \end{vmatrix}$
---	--

Dans le référentiel (R) de l'aimant

Dans le référentiel (R') de la spire

* Nous ne nous intéressons pas ici à l'expression des composantes de \vec{B}' dans (R')

La distinction arbitraire entre repos et mouvement est ainsi levée . Un problème de magnétostatique dans (R) devient dans (R') un problème d'électromagnétisme . Nous retiendrons qu'il est nécessaire d'être vigilant quant au choix du référentiel galiléen le plus adéquat pour la résolution d'un problème d'électromagnétisme. Dans son *introduction* , Einstein indique que d'autres situations du même genre auraient pu être présentées : on pense, par exemple, à un problème d'électrostatique qui, pour un observateur en mouvement, devient un problème d'électromagnétisme. On mesure tout l'intérêt de résoudre le problème dans le référentiel où les lois de la physique s'expriment le plus simplement et d'appliquer ensuite les formules de transformation des champs .

Après cette parenthèse didactique , revenons à l'article lui même qui n'est pas pour autant terminé . Einstein traite encore l'effet Doppler et l'aberration stellaire . Il n'insiste pas sur l'importance des résultats qu'il obtient sinon en indiquant qu'il déduit une expression de la loi de l'aberration sous sa forme la plus générale . A ce stade il aurait pu préciser qu'il donnait là une interprétation indiscutable du phénomène d'aberration sans avoir recours à la théorie de Fresnel . D'autre part, il n'indique pas explicitement qu'il prévoit un effet Doppler transverse dont la confirmation expérimentale sera seulement apportée en 1938 par Ives et Stillwell .

Einstein déduit également à partir des relations de transformation des champs \vec{E} et \vec{B} une expression de l'énergie de l'onde lumineuse qui varie suivant la même loi que la fréquence avec l'état de mouvement de l'observateur . Là encore , il reste dans le cadre de la logique interne de son article sans faire allusion à ses propres travaux sur les quanta de lumière qui seront pourtant publiés eux aussi dans le tome 17 de *Annalen der Physik* . Dans le même paragraphe il poursuit en établissant l'expression de la pression de radiation qui s'exerce sur un miroir parfaitement réfléchissant .

L'article se termine sur une première approche de la dynamique relativiste à travers l'étude de la trajectoire d'un électron dans un champ magnétique uniforme . Einstein obtient les expressions maintenant classiques des masses "longitudinale" et "transversale" variant avec la vitesse *. Il conclut à l'impossibilité pour une particule matérielle de dépasser la vitesse

* Masse qui correspond à ce que nous appelons aujourd'hui "inertie" (recommandation de la commission Lagarrigue).

de la lumière et termine son article en donnant les caractéristiques de la trajectoire de l'électron relativiste .

INCIDENCES DE L'ARTICLE - CONCLUSION

Nous avons déjà évoqué au fur et à mesure de l'exposé l'importance des résultats obtenus . Il faudra en fait des années de travail à la communauté scientifique pour déduire toutes les conséquences expérimentales et théoriques de cet article fondamental . Einstein lui-même , trois mois plus tard publie dans le tome 18 de *Annalen der Physik* un article complémentaire où il introduit l'idée que la masse m d'un corps émettant l'énergie E sous forme de rayonnement doit décroître d'une quantité Δm égale à $\frac{E}{c^2}$. L'article de base qui explicite et discute la fameuse relation $E = m c^2$ paraît en 1907 dans *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* . Dans le même article sont posées les bases physiques de la relativité générale ; une longue période de réflexion et de travail personnel sera nécessaire pour qu'il établisse en 1916 la théorie de la relativité générale .

En 1909 une nouvelle étape est franchie avec la contribution des physiciens américains Lewis et Tolman qui donnent une formulation complète de la dynamique relativiste seulement abordée dans l'article d'Einstein . La même année Minkowski , qui fut le professeur de mathématiques d'Einstein au Polytechnicum de Zurich , propose l'élégant et puissant formalisme à quatre dimensions qui contribuera à séduire les théoriciens les plus sceptiques .

Paradoxalement alors que la théorie de la relativité générale était confirmée expérimentalement dès 1919 par Eddington , il fallut attendre 1923 pour que Compton vérifiât les hypothèses d'Einstein sur les quanta de lumière et en même temps , les lois relativistes de conservation de l'énergie et de l'impulsion . La relation $\Delta E = c^2 \Delta m$ reçut confirmation en 1932 grâce aux expériences de Cockroft et Walton . Le physicien allemand Hahn découvrit en 1938 dans la fission nucléaire le processus permettant d'exploiter l'équivalence masse-énergie avec les conséquences que l'on connaît . Pour les effets cinématiques nous avons déjà signalé qu'il fallut attendre 1938 pour que soit vérifié expérimentalement l'effet Doppler transverse .

Quant à l'effet de "dilatation du temps" il fut confirmé par les

expériences sur l'étude de la durée de vie des muons cosmiques , en 1941 par Rossi et Hall, puis en 1963 par Frish et Smith . Ajoutons que de nos jours la relativité restreinte est vérifiée régulièrement dans le cadre des nombreuses expériences effectuées par les physiciens des particules de haute énergie .

En conclusion, nous dirons que la relativité restreinte s'appuie historiquement sur la théorie électromagnétique de Maxwell et sur les travaux de nombreux théoriciens et expérimentateurs dont la réflexion scientifique reste étroitement subordonnée aux faits expérimentaux observés . Le caractère révolutionnaire de l'article d'Einstein réside dans l'originalité de la démarche . En effet, à partir d'une réflexion critique et approfondie sur les contradictions de la physique classique , réflexion qui implique a priori un refus des explications de circonstance jusqu'ici proposées pour interpréter les différentes expériences , Einstein retient un nombre limité de principes essentiels, abandonne les concepts superflus et ose remettre en question la mécanique newtonienne .

Grâce à l'élaboration de procédés de mesure par la pensée compatibles avec les principes énoncés , en codifiant la mesure de l'espace et du temps , il construit une théorie cohérente qui intègre les connaissances anciennes, élimine les contradictions et prévoit avant expérience de nouveaux phénomènes .

Dans l'article est absente toute argumentation qui aurait pu être développée pour démontrer la validité des hypothèses . En particulier, il n'est fait aucune référence explicite aux expériences célèbres déjà évoquées . L'élégance de la démarche, la logique interne de l'article et sa valeur prédictive suffisent pour convaincre .

En mettant ainsi en place la théorie de la relativité restreinte Einstein fournit, à partir du principe d'invariance des lois physiques , une formulation qui concilie les points de vue apparemment différents d'observateurs galiléens Cette théorie contribuera à unifier les champs électrique et magnétique, les concepts d'espace et de temps mais aussi ceux de masse et d'énergie . Il faudra encore à Einstein environ dix années de réflexion solitaire pour élaborer la théorie de la relativité générale qui trouve aujourd'hui sa consécration dans les travaux les plus récents d'astrophysique et de cosmologie .

BIBLIOGRAPHIE

- BALIBAR F., Galilée, Newton lus par Einstein, Presses Universitaires de France, 1986 .
- BARRAT J. P., Electromagnétisme et Relativité Restreinte, Ediscience, 1972 .
- COCKROFT J. D. and WALTON G. T., Proc. Roy. Soc. A137, 229, 1932 .
- COMPTON A. H., Phys. Rev. 21, 483, 1923.
- EINSTEIN A., Annalen der Physik 17, 891, 1905 - idem, 18, 639, 1905.
Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité (traduction M. Solovine), Gauthier - Villars, 1972.
Comment je vois le monde, Flammarion, 1979.
- EINSTEIN A. et BORN M., Correspondance 1916 - 1955, Editions du Seuil, 1972.
- EINSTEIN A. et BESSO M., Correspondance 1903 - 1955, Collection Savoir, 1979.
- FRENCH A. P., (sous la direction de), EINSTEIN le livre du Centenaire. Edition française de G. Delacôte et J. Souchon - Royer, Hier et Demain, 1979.
- FRISCH D. H. and SMITH J. H., Am. J. Phys., 31, 342, 1963.
- GOLBERG S., Am. J. Phys., 35, 934, 1967.
- GROSSETETE C., Relativité restreinte et structure atomique de la matière, Collection Ellipses, 1985.
- HOFFMANN B. et DUKAS H., Albert Einstein : créateur et rebelle (traduction M. Manly), Editions du Seuil, 1975 .
- HOLTON G., Am. J. Phys., 28, 627, 1960, idem, 37, 968, 1969 .
- IVES H. E. and STILLWELL G. R., J. Opt. Soc. Am., 28, 215, 1938 .
- LEWIS G. N. and TOLMAN R. C., Phil. Mag., 18, 510, 1909 .
- LEVY - LEBLOND J. M., La relativité aujourd' hui, La Recherche, vol. 10, n° 96, 1979 .
- LORENTZ H. A., Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Karpen, p 28, Brill, Leiden, 1895 .
- MACH F., The Science of Mechanics, Open Court Publishing Company, La Salle, Illinois, 1933, (traduction française E. Bertrand), La Mécanique, exposé historique et critique de son développement.
- MAXWELL J. C., Collected Scientific Papers, Dover, New York, 1952.
Traité d'électricité et de magnétisme, publié par W. Garnet,
(traduction française G. Seligmann) Gauthier - Villars, 1885 - 1887 .

- MINKOWSKI H., Traduction anglaise dans *The Principle of Relativity*, Dover Publications Inc. (article de 1909).
- POINCARÉ H. A., *Monist*, 15, 1, 1905.
- ROSSI B. and HALL D. B., *Phys. Rev.*, 59, 223, 1941.
- ROSSER W. G., *An Introduction to the theory of Relativity*, Butterworths, Londres, 1964.
- SMITH J. H., *Introduction à la Relativité*, Edition française dirigée par J. M. Levy - Leblond, Ediscience, 1973.
- WHITROW G. J., (sous la direction de), *Einstein: the man and his achievement*, British Broadcasting Corporation, Londres, 1967.
- WHITTAKER E. T., *A History of the Theories of Aether and Electricity*, T. Nelson, Londres, 1951 ; H. Torchbooks, New York, 1960.