

**Zeitschrift:** Archives des sciences [1948-1980]  
**Herausgeber:** Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève  
**Band:** 2 (1949)

**Artikel:** Le coefficient d'inertie : (la masse) et le mouvement  
**Autor:** Sivadjian, Joseph  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-739722>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 30.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# LE COEFFICIENT D'INERTIE (LA MASSE) ET LE MOUVEMENT

PAR

**Joseph SIVADJIAN**

(Avec 2 fig.)

---

Stokes avait montré dès 1843 que lorsqu'un corps solide se meut dans un milieu illimité rempli d'un fluide qui n'oppose aucune résistance au frottement, l'effet de la pression du fluide était équivalent à une augmentation de la masse du corps, cet effet se manifestant uniquement dans les cas de mouvements accélérés ou retardés. « Lorsqu'un cylindre oscille, disait-il, dans un fluide s'étendant à l'infini, l'effet de l'inertie du fluide se traduit par l'augmentation de la masse du cylindre par celle du fluide déplacé. J'ai trouvé dans l'article 9 que lorsqu'un pendule sphérique oscille à l'intérieur d'une enveloppe sphérique concentrique, l'effet de l'inertie du fluide consiste à augmenter la masse de la sphère d'une quantité égale à  $\frac{b^3 - 2a^3}{2(b^3 - a^3)}$  fois la masse du fluide déplacé,  $a$  étant le rayon de la sphère et  $b$  celui de l'enveloppe. »<sup>1</sup>

En 1881, J. J. Thomson, s'inspirant de la théorie de Maxwell sur les courants de déplacement, exprima l'idée que le mouvement d'une sphère portant une charge électrique, à cause du champ magnétique que produit une telle charge en mouvement, aurait pour effet d'ajouter une masse supplémentaire

<sup>1</sup> G. G. STOKES, *Trans. Cambridge Phil. Soc.*, t. 8, 1849, p. 105; *Mathematical and physical Papers*, Cambridge, 1880, vol. 1, p. 17.

d'origine électrique à la masse mécanique de cette sphère. Selon cette théorie, une telle sphère devrait se comporter donc, vis-à-vis des forces extérieures, comme si sa masse était augmentée d'une certaine quantité qui dépend de sa charge et de sa forme. La sphère chargée se comporterait donc dans son déplacement comme la balle qui se meut dans un fluide parfait <sup>1</sup>.

En effet, les lignes de forces (tubes de Faraday) du champ électrique, dont se trouve entouré tout corps chargé, sont uniformément réparties dans l'espace si ce corps a la forme sphérique et reste au repos. Lorsque la sphère se meut avec une vitesse qui reste faible par rapport à celle de la lumière, les tubes de Faraday conservent leur distribution uniforme et leur direction radiale, exactement comme si la sphère était au repos. Ils sont simplement entraînés par la sphère. Pour une sphère de centre O et de charge  $e$ , la densité des tubes de Faraday en un point P de son voisinage est  $\frac{e}{4\pi OP^2}$ . Si nous admettons que cette sphère se meut avec la vitesse  $v$  suivant une direction qui fait un angle  $\theta$  avec la direction OP, la force magnétique à ce point P sera  $\frac{ev \sin \theta}{r^2}$ . Elle sera dirigée perpendiculairement sur OP et sur la direction du mouvement de la sphère. Les lignes de force magnétique formeront ainsi des cercles ayant leurs centres situés sur la trajectoire du centre de la sphère. Un champ magnétique étant le siège d'une énergie, la valeur de celle-ci sera égale à  $\frac{\mu H^2}{8\pi}$  unités d'énergie par unité de volume, si l'on admet que H représente la force magnétique de l'endroit, et  $\mu$  la perméabilité magnétique du milieu. Dans le cas de la sphère en mouvement, on aura au point P une quantité d'énergie égale à  $\frac{\mu e^2 v^2 \sin^2 \theta}{8\pi OP^4}$  par unité de volume. La somme de cette énergie pour toutes les parties du champ en dehors de la sphère s'élèvera à  $\frac{\mu e^2 v^2}{3a}$ ,  $a$  étant le rayon de la sphère. Si l'on admet en outre que  $m$  est sa masse, son énergie cinétique sera alors égale à  $\frac{1}{2}mv^2$ , à laquelle il faudra encore ajouter l'énergie magné-

<sup>1</sup> J. J. THOMSON, *Philosoph. Mag.* (5), 11, 229, 1881.

tique  $\frac{\mu e^2 v^2}{3a}$  qui est en dehors de la sphère. L'énergie cinétique totale du système sera :

$$\frac{1}{2} \left( m + \frac{2\mu e^2}{3a} \right) v^2 ;$$

'énergie donc est la même que si la masse de la sphère, au lieu de  $m$ , était

$$m + \frac{2\mu e^2}{3a} .$$

Par suite de la charge électrique, la masse de la sphère se trouve donc augmentée de  $\frac{2\mu e^2}{3a}$ . Ceci montre qu'une partie de la masse de la sphère chargée est due à sa charge et elle présente en outre des analogies avec une sphère se mouvant dans un liquide non visqueux. La sphère entraîne en effet dans son mouvement le fluide, dont elle est entourée, avec une vitesse proportionnelle à sa propre vitesse. Nous ne pouvons donc pas mettre la sphère en mouvement sans mouvoir en même temps le liquide qui l'entoure, de sorte que la sphère se comporte, ainsi que Stokes l'avait montré, comme si sa masse était accrue par la masse d'un certain volume du fluide. S'il s'agit d'un cylindre se mouvant perpendiculairement à sa longueur, l'accroissement de sa masse est égal à la masse d'un égal volume de liquide. Pour un corps allongé cylindrique, l'augmentation de la masse dépend d'ailleurs de la direction dans laquelle le corps se déplace : moins importante lorsque le mouvement a lieu droit dans le sens de sa longueur, elle est plus considérable lorsque le corps se meut dans une direction oblique. La masse d'un tel corps dépend par conséquent de la direction dans laquelle il se meut.

Supposons maintenant que nos tubes de Faraday se comportent à beaucoup près comme se comportent des cylindres longs et étroits qui se meuvent dans l'eau. Si ceux-ci se meuvent parallèlement à leur longueur, ils entraînent avec eux peu d'eau, mais s'ils se meuvent normalement à leur axe, chaque unité de longueur du tube entraîne avec elle une certaine masse

d'eau. Pour un cylindre, dont la longueur est très grande par rapport à sa largeur et qui se meut dans le sens de sa longueur, la masse d'eau qu'il entraîne dans son mouvement peut être négligée en comparaison de celle qu'il entraîne quand il se meut dans le sens perpendiculaire à son axe.

J. J. Thomson<sup>1</sup>, après avoir illustré par cette analogie hydrodynamique sa conception de la masse électrodynamique, ajoute: « Si le tube ne possédait pas d'autre masse que celle qu'il acquiert par le déplacement de l'eau, il aurait de la masse pour le mouvement dans le sens perpendiculaire à son axe, mais aucune pour le mouvement dans le sens de sa longueur. »<sup>2</sup> Puis il rappelle un principe de la dynamique, d'après lequel un corps cylindrique en mouvement libre au lieu de progresser la pointe en avant, se meut dans le sens de sa largeur de façon à entraîner le plus possible de fluide dans lequel il se meut. Il applique ce principe à sa sphère chargée en mouvement et il montre que les tubes de Faraday attachés à la sphère tendront à se mettre perpendiculairement à la direction du mouvement de la sphère, de sorte que, dit-il, si ce principe était seul à prendre en considération, tous les tubes de Faraday seraient poussés dans le plan équatorial, c'est-à-dire le plan qui est normal à la direction du mouvement de la sphère. Mais comme ces tubes se repoussent mutuellement, ils occuperont une position intermédiaire entre leur position primitive radiale et leur position équatoriale en se mettant en plus grand nombre dans la région équatoriale que dans les autres régions. La différence augmentera avec la vitesse avec laquelle la charge se meut. Quand les tubes de Faraday se pressent dans la région équatoriale, ils entraînent une quantité d'éther beaucoup plus considérable que s'ils se trouvent près des pôles, de sorte que le déplacement des tubes de Faraday du pôle à l'équateur augmente la quantité d'éther renfermée par les tubes et, par conséquent, la masse de la sphère<sup>3</sup>. La masse supplémentaire, qui

<sup>1</sup> *Electricité et Matière*, par J. J. THOMSON, traduit de l'anglais par Maurice Solovine, Paris, Gauthier-Villars & C<sup>ie</sup>, édit., 1922, ch. I, p. 17-19.

<sup>2</sup> *Ibid.*, ch. II, p. 32-33.

<sup>3</sup> *Ibid.*, p. 36-37.

s'ajoute à celle d'un corps chargé en mouvement, est due par conséquent, d'après cet auteur, à l'éther lié à cette masse <sup>1</sup>.

Les études théoriques de Heaviside <sup>2</sup>, de Thomson <sup>3</sup>, de Morton <sup>4</sup> et de Searle <sup>5</sup> ont apporté une contribution importante à la connaissance du champ qui est lié à une masse conductrice chargée en mouvement.

Heaviside a étudié en particulier l'influence que peut avoir sur le champ, c'est-à-dire sur la répartition dans l'espace des tubes de Faraday, le mouvement d'une sphère conductrice chargée, lorsque la vitesse de cette charge mobile se rapproche de la vitesse de la lumière. Il a montré que la charge électrique d'une telle sphère reste uniformément répartie sur la surface, quelle que soit sa vitesse, tandis que le champ électrique à distance tend à se concentrer de plus en plus dans le plan équatorial, ce qui revient à dire que le mouvement de la sphère a pour effet de déplacer chaque tube de Faraday vers le plan équatorial. Ces travaux ont montré en même temps que c'est seulement lorsque la vitesse du corps chargé devient comparable à la vitesse de la lumière que le changement dans la distribution des tubes de Faraday dû au mouvement se produit d'une manière sensible et que l'augmentation de la masse en fonction de la vitesse, qui en est la conséquence, devient appréciable.

Or nous savons que les rayons cathodiques et les rayons  $\beta$  des corps radioactifs sont composés de corpuscules chargés d'électricité négative et que ces corpuscules ou électrons sont déviés de leurs trajectoires par les champs magnétique et électrique. Cette déviation suppose l'existence de la masse inerte; toutefois la masse des électrons est extrêmement petite; elle est d'environ 2000 fois plus faible que celle de l'atome

<sup>1</sup> *Electricité et Matière*, p. 33.

<sup>2</sup> O. HEAVISIDE, *Philosoph. Mag.* (5), 27, 324, 1889; *Electrical Papers*, London, 2, 504, 1892.

<sup>3</sup> J. J. THOMSON, *Recent Researches in electricity and magnetism*, 1893, p. 21.

<sup>4</sup> W. B. MORTON, *Phil. Mag.* (5), 41, 488, 1896.

<sup>5</sup> G. F. C. SEARLE, *Phil. Mag.* (5), 44, 329, 1897; (6), 13, 118, 1907; 17, 43, 1909; *Philosoph. Trans.*, 187 A, 675, 1896; *Proceed. Roy. Soc. London*, 59, 343, 1896.

d'hydrogène, tandis que leur vitesse, qui est considérable, atteint pour les rayons cathodiques, la dixième partie de la vitesse de la lumière; quant aux rayons  $\beta$ , leur vitesse se rapproche considérablement de la vitesse de la lumière. Or, conformément aux théories de Maxwell, l'électron, à cause de sa charge, doit être considéré comme étant entouré d'un champ électrique et, à cause de son mouvement, entouré également d'un champ magnétique. Ces deux champs sont entraînés avec la particule qui est donc accompagnée dans son mouvement par un champ électromagnétique que l'on nomme aussi le sillage de la particule. L'électron en mouvement doit donc être considéré comme le siège d'un flux d'énergie électromagnétique qui possède une quantité de mouvement électromagnétique.

Si nous admettons que le champ électromagnétique a un substrat auquel on donne le nom d'éther, nous pouvons admettre avec Poincaré que les électrons, en tant que molécules électrisées et conformément à l'idée de J. J. Thomson, « ne peuvent pas se déplacer sans ébranler l'éther; pour les mettre en mouvement, il faut triompher d'une double inertie, de celle de la molécule elle-même et de celle de l'éther. La masse totale ou apparente que l'on mesure se compose donc de deux parties: la masse réelle ou mécanique de la molécule, et la masse électrodynamique représentant l'inertie de l'éther »<sup>1</sup>.

Ces corpuscules étaient donc tout indiqués pour tenter de vérifier sur eux les conséquences des théories de Maxwell et de Thomson, c'est-à-dire de voir si pour des vitesses se rapprochant de la vitesse de la lumière, le second axiome de la mécanique de Newton était encore valable ou, en d'autres termes, si l'accélération était encore égale à la force agissante divisée par une masse individuelle et indépendante de la vitesse ou si, au contraire, cette masse, comme le supposait Thomson, était plutôt une fonction de cette vitesse.

Toutefois Lorentz<sup>2</sup>, mais surtout M. Abraham<sup>3</sup>, en étudiant

<sup>1</sup> H. POINCARÉ, *La Revue des idées*, 1, 811, 1904; *La Valeur de la science*, ch. VIII, p. 195.

<sup>2</sup> H. A. LORENTZ, *Physikal. Zeitschr.*, 2, 78, 1900-1901.

<sup>3</sup> M. ABRAHAM, *Nachrichten königl. Gesellsch. Wissenschaften zu Göttingen*, Mathem.-physikal. Klasse, 1902, p. 20; *Physikal. Zeitschr.*,

la question de la masse de l'électron, sont arrivés à cette conclusion que non seulement cette masse augmente avec la vitesse, mais qu'elle dépend en outre de la direction et qu'un corps animé d'une vitesse notable n'opposera pas la même inertie aux forces qui tendent à le dévier de sa route, et à celles qui tendent à accélérer ou à retarder sa marche. M. Abraham a été amené ainsi à distinguer pour la masse électromagnétique une masse longitudinale, coefficient caractéristique de l'inertie qui s'oppose à l'accélération dans le sens de son mouvement et une masse transversale qui se manifeste dans l'inertie que l'électron oppose à l'accélération dans la direction perpendiculaire à celle de sa trajectoire.

Or les études de Morton et de Searle sur le champ qui accompagne les conducteurs chargés en mouvement nous font bien connaître l'énergie électromagnétique de l'électron et nous permettent de calculer, d'après la valeur de cette énergie, sa masse longitudinale, d'après la résistance que cette particule oppose à l'accélération dans le sens de son mouvement. Mais la masse transversale qui intervient dans les expériences de déviation, les seules qui ont été réalisées jusqu'ici, ne peut pas être calculée à partir des données de ces auteurs.

Par conséquent, M. Abraham, en cherchant à déterminer la forme de la fonction  $m = f(v)$ , est parti de l'hypothèse que l'électron était un corpuscule sphérique indéformable et portant une charge électrique répartie uniformément soit en surface, soit en volume. Abraham, à l'aide de ces hypothèses, trouva que la fonction cherchée était de la forme :

$$f(v) = \frac{3}{4\beta^2} \left[ \left( \frac{1 + \beta^2}{2\beta} \right) \text{Log} \left( \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right) - 1 \right].$$

$\beta$  étant la vitesse de la particule, rapportée à celle de la lumière. Cette formule donnait l'augmentation de la masse en fonction de la vitesse dans le cas où la force agissant sur l'électron était normale à la trajectoire. La valeur de la fonction  $m$  trouvée est

4, 57, 1902-1903; *Ann. der Physik* (4), 10, 105, 1903; *Theorie der Elektrizität*, t. II, Leipzig, B. G. Teubner, 1905, ch. III, § 22, p. 205.

donc ce qu'il appelait la masse transversale et il concluait que toute la masse de l'électron était d'origine électromagnétique.

Lorentz <sup>1</sup>, au cours de ses études théoriques sur l'optique des corps en mouvement, fut amené à admettre la contraction générale des corps dans le sens de leur mouvement, dans le rapport de  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  à 1; et comme conséquence de cette théorie, il fut obligé de supposer que toutes les forces, quelle que soit leur origine (forces moléculaires, électrostatiques, etc.) étaient réduites dans la même proportion, dans un milieu animé d'un mouvement de translation uniforme; il ne pouvait donc pas en être autrement, concluait-il, des forces d'inertie et il admettait par conséquent que les masses de toutes les particules fussent influencées par une translation au même degré que les masses électromagnétiques des électrons <sup>2 3</sup>.

Conformément donc à son hypothèse de la contraction générale des corps en mouvement, Lorentz admettait que l'électron qui, au repos, a une forme sphérique, subissait sous l'influence d'un mouvement de translation, une contraction telle que son rayon primitif  $R$  deviendrait  $R\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  dans la direction du mouvement, tandis que le diamètre équatorial restait égal au diamètre de la sphère primitive. L'électron prenait ainsi la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati; cette constance du diamètre équatorial implique en outre la diminution du volume de l'électron à mesure que sa vitesse augmente en fonction de l'augmentation de sa vitesse.

Einstein <sup>4</sup> arrivait à une conclusion identique, en appliquant à ses raisonnements les principes de la relativité restreinte. Ces deux auteurs trouvaient ainsi que,  $m_0$  étant la masse de

<sup>1</sup> H. A. LORENTZ, *Koninkl. Akad. van Wetenschappen te Amsterdam*, Proceed. of the Section of sciences, t. 6, 1904, p. 809.

<sup>2</sup> H. A. LORENTZ, *Ibid.*, p. 826; *Elektronentheorie*, p. 257.

<sup>3</sup> H. POINCARÉ, *Ibid.*, p. 812.

<sup>4</sup> A. EINSTEIN, *Ann. der Physik.* (4), 17, 891, 1905. *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*, par A. EINSTEIN, trad. par M. Solovine, Paris, Gauthier-Villars & C<sup>ie</sup>, 1925.

l'électron au repos, dans le cas du mouvement cette masse devenait :

$$m' = \frac{m_0}{(1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

pour le sens transversal et

$$m'' = \frac{m_0}{(1 - \beta^2)^{\frac{3}{2}}}$$

pour le sens longitudinal,  $\beta$  étant le rapport  $v/c$  de la vitesse de l'électron à celle de la lumière.

Bucherer<sup>1</sup> et Langevin<sup>2</sup> admettaient au contraire que la déformation de l'électron s'effectue sans changement du volume, ce qui entraîne l'augmentation du diamètre équatorial avec la vitesse. D'après ces auteurs, on retrouve ainsi la forme ellipsoïdale aplatie attribuée par Lorentz à l'électron, dont la masse transversale, seule accessible jusqu'ici à l'expérience, comme nous l'avons dit, est donnée par la formule

$$m' = \frac{m_0}{(1 - \beta^2)^{\frac{1}{3}}}$$

Poincaré<sup>3</sup> a montré que l'hypothèse de Langevin a l'avantage de se suffire à elle-même, puisqu'il suffit, dit-il, de regarder l'électron comme déformable et incompressible pour expliquer qu'il prenne quand il est en mouvement, la forme ellipsoïdale, mais on pouvait aussi mettre l'hypothèse de Lorentz d'accord avec les formules en supposant que l'électron, déformable et compressible, est soumis à une sorte de pression constante extérieure, dont le travail est proportionnel aux variations de volume.

<sup>1</sup> *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie*, von A.H. BUCHERER, Leipzig, 1904, B. G. Teubner, § 5, p. 57.

<sup>2</sup> P. LANGEVIN, *Revue gén. des Sciences*, 16, 257, 1905; *La physique depuis vingt ans*, Librairie Octave Doin, Paris, 1923, ch. I, p. 38.

<sup>3</sup> H. POINCARÉ, *C. R. Acad. Sc.*, 140, 1504, 1905; *Revue gén. des Sciences*, 19, 386, 1908; *La mécanique nouvelle*, Conférence, Mémoire et Note sur la théorie de la relativité, Paris, Gauthier-Villars & C<sup>te</sup>, 1924, p. 79.

Ainsi, abandonnant l'analogie hydrodynamique qui avait servi de guide à Thomson pour énoncer la notion de la masse électromagnétique et, oubliant totalement les hypothèses de l'éther et des tubes de forces qui, par une ingénieuse matérialisation de la notion abstraite de champ, lui avaient permis de concevoir l'idée de la variation de la masse électromagnétique en fonction de la vitesse des corps chargés en mouvement et surtout, après que des expériences dues à Kaufmann eurent prouvé la réalité de cette variation, on arrivait à soutenir que cette variation de la masse en fonction de la vitesse, sans aucun rapport avec l'existence d'un champ magnétique et, par conséquent, n'étant pas un fait spécial limité aux seuls corps portant une charge électrique, était un phénomène absolument général, dont il fallait chercher le secret dans la théorie de la relativité et dans la transformation de Lorentz qui sert de fondement à cette théorie.

Après cela, il a paru sans inconvénient d'admettre que non seulement la masse entière de l'électron, ainsi que l'avait supposé M. Abraham, mais aussi toutes les masses en général, étaient d'origine électromagnétique et qu'il n'y avait pas du tout de masse mécanique.

Kaufmann<sup>1 2 3 4 5</sup> et Starke<sup>6</sup> ont montré d'abord qualitativement pour les rayons  $\beta$  du radium et pour les rayons cathodiques, la réalité de cette augmentation de la masse avec la vitesse; Kaufmann<sup>7</sup> a repris ensuite l'étude de la question et, à la suite d'un très grand nombre de mesures précises, il arriva à des résultats qui ne vérifiaient pas les formules de Lorentz et Einstein, mais qui concordaient bien soit avec celle

<sup>1</sup> W. KAUFMANN, *Nachrichten von der königl. Gesellsch. der Wissenschaften zu Göttingen*, Mathem. physikal. Klasse, Heft 2, 143, 1901.

<sup>2</sup> W. KAUFMANN, *Nachrichten*, Heft 5, 291, 1902; Heft 3, 90, 1903.

<sup>3</sup> W. KAUFMANN, *Physikal. Zeitschr.*, 4, 54, 1902.

<sup>4</sup> W. KAUFMANN, *Ann. der Physik* (4), 19, 487, 1906; 20, 639, 1906.

<sup>5</sup> M. PLANCK, *Verhandlungen deutschen physikal. Gesellsch.*, 8, 418, 1906; *Physikal. Zeitschr.*, 7, 753, 1906; *Verhandlungen deutschen physikal. Gesellsch.*, 9, 301, 1907.

<sup>6</sup> H. STARKE, *Verhandlungen deutschen physikal. Gesellsch.*, 5, 241, 1903.

<sup>7</sup> W. KAUFMANN, *Annalen*, *ibid.*

d'Abraham, soit avec celle de Bucherer et Langevin, sans pouvoir choisir cependant entre ces deux dernières hypothèses. Ces résultats ont soulevé une violente critique de la part de Heil <sup>1</sup>.

Par contre Bucherer <sup>2</sup>, en travaillant avec le fluorure de radium, concluait en faveur de l'hypothèse de Lorentz-Einstein et abandonnait ainsi sa propre théorie.

Bestelmeyer <sup>3</sup> a pu montrer cependant que les résultats de Bucherer ne l'autorisaient pas à formuler de telles conclusions <sup>4</sup>. Les expériences de Bucherer ont été discutées en outre par Lewis <sup>5</sup>, Doi <sup>6 7 8</sup>, Scott <sup>9</sup>, Schottky <sup>10</sup>, Wien <sup>11</sup>, Cunningham <sup>12</sup> et Bidwell <sup>13</sup>.

Neumann <sup>14</sup> et Schaeffer <sup>15</sup> ont repris la méthode et le dispositif de Bucherer avec de faibles modifications de détails et ils ont obtenu, comme résultat, une nouvelle vérification des formules de Lorentz et d'Einstein, dans des limites de vitesses comprises entre  $\beta = 0,4$  et  $0,7$ , et une concordance moins grande avec les formules pour la région de  $\beta = 0,7$  à  $0,8$ .

<sup>1</sup> *Zur Theorie der Kaufmannschen Versuche über die elektromagnetische Ablenkung der  $\beta$ -Strahlen*, Inaugural Dissertation von Wilhelm HEIL, Berlin, 1909.

<sup>2</sup> A. H. BUCHERER, *Verhandlungen deutschen physikal. Gesellsch.*, 10, 688, 1908, p.; *Physikal. Zeitschr.*, 9, 755, 1908; *Ann. der Physik* (4), 28, 513, 1909; 29, 1063, 1909.

<sup>3</sup> A. BESTELMEYER, *Ann. der Physik* (4), 30, 166, 1909; 32, 231, 1910.

<sup>4</sup> A. H. BUCHERER, *Ann. der Physik* (4), 30, 974, 1909.

<sup>5</sup> T. LEWIS, *Proceed. Roy. Soc. London*, Ser. A, 107, 544, 1925.

<sup>6</sup> U. DOI, *Scientif. Papers*, Tokyo, 3, 163, 1925, 178; *Philosoph. Mag.* (6), 49, 434, 1925.

<sup>7</sup> A. H. BUCHERER, *Philosoph. Mag.* (6), 50, 551, 1925.

<sup>8</sup> A. H. BUCHERER, *Philosoph. Mag.* (6), 15, 316, 1908.

<sup>9</sup> G. A. SCHOTT, *Philosoph. Mag.* (6), 50, 389, 1925.

<sup>10</sup> W. SCHOTTKY, *Physikal. Zeitschr.*, 13, 421, 1912.

<sup>11</sup> W. WIEN, *Ann. der Physik* (4), 5, 501, 1901; *Arch. néerl. des Sciences* (2), 5, 96, 1900.

<sup>12</sup> E. CUNNINGHAM, *Phil. Mag.* (6), 16, 423, 1908; 14, 538, 1907,.

<sup>13</sup> E. BIDWELL, *Phil. Mag.* (6), 16, 419, 1908.

<sup>14</sup> G. NEUMANN, *Ann. der Physik* (4), 45, 529, 1914.

<sup>15</sup> C. SCHAEFFER, *Ann. der Physik* (4), 59, 934, 1916; *Verhandl. der deutschen physikal. Gesellschaft*, 15, 935, 1915; *Physikal. Zeitschr.*, 14, 1117, 1913.

Lahaye<sup>1</sup>, en travaillant avec la méthode de Kaufmann, c'est-à-dire en faisant agir simplement un champ électrique et un champ magnétique sur les rayons  $\beta$  d'une préparation de radium, a obtenu des résultats conformes à ceux prévus par la formule de Lorentz.

Ces recherches ont été également effectuées en se servant des rayons cathodiques de grande vitesse. C'est ainsi qu'a procédé Starke, l'un des premiers qui s'est contenté, comme nous l'avons dit déjà, des résultats qualitatifs qu'il a obtenus avec les rayons cathodiques de faibles vitesses. Proctor<sup>2</sup> s'est adressé aux rayons cathodiques de vitesses comprises entre 12 et 43% de la vitesse de la lumière et ses résultats l'ont amené à admettre la formule d'Abraham en rejetant celle de Lorentz.

Jones<sup>3 4</sup> par contre, à la suite d'une étude du même genre, s'est prononcé en faveur de la formule de Lorentz-Einstein et contre celle d'Abraham.

Hupka<sup>5</sup> a mesuré le potentiel de décharge à la cathode et la déviation magnétique obtenue par un champ magnétique d'intensité connue et il a trouvé une très grande concordance entre ses résultats et la formule de Lorentz-Einstein et ceci, dans de grandes limites de vitesses (de  $\beta = 0,35$  à  $0,53$ ), résultats qui ont donné cependant lieu à une grave critique de Heil<sup>6</sup>.

Guye et Ratnowsky<sup>7 8</sup> ont employé une méthode de trajectoires identiques; ils ont obtenu des résultats incompatibles avec la formule d'Abraham et ne vérifiant qu'imparfaitement celle de Lorentz-Einstein. Enfin, Guye et Lavanchy<sup>9 10</sup> ont

<sup>1</sup> H. LAHAYE, *Ann. der Physik.* (5), 34, 60, 1939.

<sup>2</sup> C. A. PROCTOR, *Phys. Rev.*, 30, 53, 1910.

<sup>3</sup> L. T. JONES, *Phys. Rev.* (2), 8, 53, 1916.

<sup>4</sup> L. T. JONES et W. C. POMEROY, *Phys. Rev.* (2), 20, 110, 1922.

<sup>5</sup> E. HUPKA, *Ann. der Physik* (4), 31, 169, 1910.

<sup>6</sup> W. HEIL, *Ann. der Physik* (4), 31, 519, 1910.

<sup>7</sup> C.-E. GUYE et S. RATNOWSKY, *C. R. Acad. Sc.*, 150, 326, 1910.

<sup>8</sup> C.-E. GUYE et S. RATNOWSKY, *Arch. Sc. Phys. et natur.*, Genève, 31, 293, 1911; thèse par Simon RATNOWSKY, Genève, 1911.

<sup>9</sup> C.-E. GUYE et Ch. LAVANCHY, *Arch. Sc. phys. et natur.*, Genève, 40, 166, 334; 42, 286, 353, 441, 1916; *C. R. Acad. Sc.*, 161, 52, 1915.

<sup>10</sup> C.-E. GUYE, *Mémoires de la Soc. Phys. et Hist. nat. Genève*, 39, 273, 1921.

réussi à vérifier la formule de Lorentz-Einstein avec une grande exactitude, en s'adressant à la même méthode des trajectoires identiques.

La masse, dont on observe la variation, est celle des corpuscules cathodiques du tube de Braun, lancés avec des vitesses qui, mesurées en prenant comme unité la vitesse de la lumière, s'échelonnent entre 0,23 et 0,49.

La méthode permet de comparer la vitesse  $\nu'$  et la masse  $m'$  d'un corpuscule à la vitesse  $\nu$  et à la masse  $m$  d'un électron de comparaison de faible vitesse. Soient  $I, I', V, V'$  les intensités du courant qui produit le champ magnétique et les tensions entre les plateaux du condensateur qui produit le champ électrique, lorsque les déviations sont  $x$  et  $x'$  pour le champ électrique,  $y, y'$  pour le champ magnétique, aux vitesses  $\nu$  et  $\nu'$  de l'électron. Si  $x$  est assez voisin de  $x'$  et  $y$  de  $y'$  pour que les intégrales de champ puissent être considérées comme constantes, on a

$$\frac{m'}{m} = \frac{VI'^2}{V'I^2} \frac{y^2 x'}{xy'^2} \quad \frac{\nu'}{\nu} = \frac{IV'}{I'V} \frac{xy'}{x'y}$$

On voit sur la courbe donnée par les auteurs que les points calculés dans l'hypothèse de Lorentz-Einstein se placent de façon très heureuse près de la courbe théorique Lorentz-Einstein, tandis que les points calculés dans l'hypothèse Abraham divergent notablement et de façon systématique de la courbe théorique Abraham. L'écart moyen est + 0,0002 pour Lorentz-Einstein, + 0,0112 pour Abraham, soit 50 fois plus grand que dans le second cas <sup>1</sup>. Nacken <sup>2</sup> a repris en 1935 les expériences de Guye et de ses collaborateurs, en poussant ses mesures jusqu'à  $\beta = 0,70$  et il a constaté que la loi de Lorentz est vérifiée aux erreurs d'expérience près.

L'inertie de l'électron est-elle d'origine entièrement électromagnétique, c'est-à-dire est-elle due absolument à l'action dynamique de son champ électro-magnétique ? Ou bien, il faut encore ajouter à cette masse électro-magnétique une masse matérielle, indépendante de sa charge électrique.

<sup>1</sup> GUYE, RATNOWSKY et LAVANCHY, *ibid.*

<sup>2</sup> M. NACKEN, *Ann. der Physik.* (5), 23, 313, 1935.

J. J. Thomson, en calculant le rapport des masses des électrons émis par le radium, quand ceux-ci se meuvent rapidement, à la masse des mêmes particules lorsqu'elles sont en repos ou se meuvent lentement et en comparant les résultats de ses calculs avec les valeurs du même rapport, telles qu'elles ont été déterminées par les expériences de Kaufmann, est arrivé à la conclusion que toute la masse de ces particules électriques provient de leur charge <sup>1</sup>.

C'était là également l'avis de Kaufmann <sup>2</sup>, d'Abraham <sup>3</sup> et de plusieurs autres auteurs encore <sup>4</sup>.

Nous avons vu au contraire que pour Poincaré, la masse réelle ou mécanique de l'électron était entièrement distincte de la masse électrodynamique, qui ne représentait en quelque sorte que l'inertie de l'éther.

Lewis <sup>5</sup> n'accepte pas la distinction entre la masse pondérale et la masse électro-dynamique; il n'admet que l'existence d'une seule espèce de masse, dont il ne cherche pas cependant à préciser l'origine.

Quant à Tolman <sup>6 7 8 9</sup>, la distinction même entre la masse transversale et la masse longitudinale est une chose inadmissible. Il fait remarquer que si la masse est une quantité à laquelle s'applique la loi de conservation, la masse d'un corps ne doit et ne peut pas différer suivant les différentes directions et il estime que, d'une manière générale, et sans tenir compte de la direction, l'expression

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

est celle qui convient à la masse d'un corps en mouvement.

<sup>1</sup> J. J. THOMSON, *Electricité et Matière*, ch. II, p. 41.

<sup>2</sup> W. KAUFMANN, *Nachrichten*, 291, 1902; 90, 1903.

<sup>3</sup> M. ABRAHAM, *Ibid.*

<sup>4</sup> W. C. BAKER, *Phys. Rev.*, 30, 634, 1910.

<sup>5</sup> G. N. LEWIS, *Phil. Mag.* (6), 16, 705, 1908.

<sup>6</sup> R. C. TOLMAN, *Phil. Mag.* (6), 23, 375, 688, 1912.

<sup>7</sup> R. C. TOLMAN, *Phil. Mag.* (6), 21, 296, 1911.

<sup>8</sup> G. N. LEWIS et R. C. TOLMAN, *Phil. Mag.* (6), 18, 510, 1909.

<sup>9</sup> N. CAMPBELL, *Phil. Mag.* (6), 21, 626, 1911.

Mais cette loi de conservation de la masse est d'ailleurs en contradiction flagrante avec l'idée de la variation de la masse en fonction de sa vitesse.

En effet, Langevin<sup>1</sup> donne de la masse trois définitions différentes: la masse, coefficient d'inertie; la masse, capacité d'impulsion (masse maupertuisienne de Poincaré); la masse, capacité d'énergie cinétique. Ces trois définitions sont tirées de trois principes différents: principe d'inertie, principe de conservation de la quantité de mouvement et principe de conservation de l'énergie. Mais la masse a une autre définition encore, plus intuitive celle-là et plus naturelle: la masse, quantité de matière. On peut mettre à la base de cette définition le principe de conservation de la quantité de la matière, invoqué par Tolman. Or il ne viendrait alors à l'esprit de personne que le mouvement pût être la cause de l'augmentation de cette quantité de matière, de la création de nouvelles quantités de matière.

Nous avons vu plus haut que J. J. Thomson attribuait la masse supplémentaire de la particule chargée en mouvement à l'inertie due à l'éther qui se trouve enfermée dans les intervalles des tubes de Faraday. On voit que dans cette hypothèse, l'augmentation apparente de la masse n'est pas due en réalité au mouvement, dont l'effet n'est qu'indirect. Elle est due à l'existence d'une masse extérieure à la particule chargée et que nous mettons en mouvement en même temps que la particule. Il est facile d'en conclure que si ce mouvement avait lieu dans le vide absolu, cette augmentation de la masse par le fait du mouvement eût été inexistante. Par contre si, pendant son mouvement, la particule rencontrait un obstacle lui empêchant de continuer sa progression, personne n'aurait eu l'idée d'interpréter l'existence de cet obstacle mécanique en admettant que la masse de notre particule est devenue infinie.

D'ailleurs, dire que toute la masse des particules électrisées analogues à l'électron provient de leur charge et qu'elle est par conséquent d'origine entièrement électro-magnétique, veut dire

<sup>1</sup> P. LANGEVIN, *J. de Physique* (5), 3, 553, 1913; *La Physique depuis vingt ans*, ch. VII, § 1-3, p. 345.

que toute la masse, toute l'inertie de ces particules est due à cet éther hypothétique que l'on suppose entraîné par le mouvement de la particule. Nous refusons ainsi l'inertie et la masse aux particules matérielles dont l'existence ne fait pas de doute et qui sont, pour ainsi dire, visibles, pour l'attribuer à une substance hypothétique. Car lorsqu'on émet une hypothèse en se basant sur des analogies (ainsi que l'a fait Thomson, en expliquant l'augmentation de la masse des particules chargées en mouvement par le rapprochement qu'il a établi entre ce fait et un fait analogue observé dans l'hydrodynamique), il faut aller jusqu'aux conséquences ultimes de cette hypothèse, sans jamais perdre de vue les analogies qui étaient à l'origine de l'hypothèse en question.

Or nous avons vu déjà que la théorie de la relativité, en généralisant davantage cette notion de la masse électrodynamique, rejetait toute idée de masse matérielle ou pondérale, pour ne conserver que celle de la masse d'origine électrodynamique, indépendante de toute charge électrique.

Le champ électromagnétique de l'électron étant dû à son mouvement, si l'électron est au repos, ce champ est nul et, par conséquent, sa masse électro-magnétique disparaît. Donc, masse électromagnétique de l'électron au repos = 0. Si l'on admet en outre que toute l'inertie de l'électron est d'origine électro-magnétique, on doit en conclure que l'électron au repos n'a pas de masse du tout et que  $m_0 = 0$ . L'électron ne peut pas posséder par conséquent de l'inertie, puisqu'il n'est pas entouré de champ électro-magnétique. Ne possédant pas de masse, il ne peut pas opposer de résistance à l'action des forces qui cherchent à le mettre en mouvement.

D'ailleurs, nous voyons d'après la formule

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

qui nous donne l'augmentation de la masse en fonction de la vitesse, que si la masse de l'électron au repos  $m_0$  est nulle, il ne peut pas en être aussi autrement de la masse  $m$  de l'électron en mouvement.

Plusieurs auteurs considèrent la variation de la masse avec la vitesse comme une manifestation purement énergétique, sans aucun rapport avec l'électro-magnétisme ou les spéculations relativistes.

Ph. Frank <sup>1</sup> fait remarquer, par exemple, que sans faire appel à la théorie de la relativité, il est possible d'arriver à obtenir les formules donnant les masses longitudinale et transversale d'un point matériel, analogues à celles de la relativité, en se basant sur des considérations purement énergétiques et dynamiques.

En effet, dit-il, en se servant de l'axiome de Duhem et de la règle classique du parallélogramme de la composition des vitesses, on arrive à établir l'identité de la masse transversale à la masse au repos et son indépendance de la vitesse, tandis qu'en généralisant cet axiome de Duhem et en se servant d'une formule de composition des vitesses analogue à celle d'Einstein et de Sommerfeld, on arrive à la formule

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{k}}}$$

où  $m$  = masse transversale et  $m_0$  = masse au repos. Cette relation est identique à celle de la relativité à condition de prendre  $k$  égal au carré de la vitesse de la lumière.

Duhem a énoncé son axiome de la manière suivante:

« *Neuvième convention.* — Pour imprimer à tous les points d'un élément matériel une certaine vitesse dans une direction D, les corps extérieurs doivent accomplir la même œuvre, soit que l'élément matériel parte du repos, soit qu'il soit primitivement animé d'une vitesse quelconque dans une direction D', normale à D. » <sup>2</sup>

Or d'après cet axiome, le rapport de la résistance de l'inertie dans l'accélération transversale à la résistance de l'inertie dans l'accélération à partir du repos est égal à l'unité. La modifica-

<sup>1</sup> Ph. FRANK, *Ann. der Physik* (4), 39, 693, 1912; *Phys. Z.*, 12, 1112, 1114, 1911.

<sup>2</sup> P. DUHEM, *Journal de Mathém. pures et appliquées* (4), 8, 304, 1892; *Traité d'Energétique*, I, 84, 1Paris, 911.

tion apportée par Frank à cet axiome de Duhem consiste à admettre que ce rapport est une certaine fonction de la vitesse instantanée.

Mais, ainsi qu'Ishiwara le lui a fait remarquer <sup>1</sup>, la modification proposée par Frank est incompatible avec la notion classique du temps et de l'espace et qu'elle s'accorde au contraire avec le temps et l'espace de la relativité.

Lewis <sup>2</sup> admet qu'en appliquant à la lumière le principe de la conservation de la quantité de mouvement qu'il déduit de l'étude de la pression de la radiation, on arrive à retrouver la relation bien connue d'Einstein  $E = mV^2$  entre l'énergie, la masse et la vitesse de la lumière et il estime qu'il suffit ensuite de généraliser cette relation et de l'appliquer à une masse quelconque pour arriver à obtenir le rapport  $\frac{m}{m_0} = 1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Ives <sup>3</sup> applique un principe analogue et retrouve la même formule et conclut que cette équation qui exprime la variation de la masse avec la vitesse est la conséquence du principe de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement dans les phénomènes de choc.

Malet <sup>4</sup> pense que la notion de la variation de la masse avec la vitesse est la conséquence nécessaire de la formule relativiste d'addition des vitesses; il oublie cependant que Lorentz a pu obtenir cette formule de la variation de la masse avec la vitesse en faisant usage de la transformation qui porte son nom et que la loi relativiste d'addition des vitesses est elle-même l'émanation, le résultat direct de cette fameuse transformation lorentzienne, dont nous avons montré, dans un autre article <sup>5</sup>, l'inutilité absolue. La tentative de Fontené <sup>6</sup> de donner les formules de la masse longitudinale et de la masse transversale pour les mouvements à grande vitesse n'échappe pas non plus à cette critique.

<sup>1</sup> J. ISHIWARA, *Phys. Z.*, 14, 26, 1913.

<sup>2</sup> G. N. LEWIS, *ibid.*

<sup>3</sup> H. E. IVES, *Phil. Mag.* (7), 36, 392, 1945; *J. opt. Soc. of Amer.*, 33, 163, 1943.

<sup>4</sup> H. MALET, *C. R. Acad. Sc.*, 180, 425, 1925.

<sup>5</sup> *Revue philosophique*, 1949.

<sup>6</sup> G. FONTENÉ, *C. R. Acad. Sc.*, 173, 1066, 1921.

More <sup>1</sup>, au lieu d'admettre que la charge électrique d'un électron en mouvement est une constante, admet au contraire qu'elle est une fonction de la vitesse de la matière. La masse électromagnétique devient ainsi, d'après lui, une sorte d'attribut de la matière comparable à la masse hydrodynamique. En effet, dit-il, l'expérience de Kaufmann a montré que le rapport  $e/m$  de la charge à la masse diminue lorsque la vitesse de l'électron augmente. Or cette relation  $e/m = f(v)$  est satisfaite si nous admettons que la charge électrique a une valeur maximum pour un électron au repos et qu'elle diminue au contraire au fur et à mesure que la vitesse de l'électron augmente, jusqu'à devenir égale à zéro, lorsque cette vitesse devient égale à celle de la lumière <sup>2</sup>.

Von Gleich <sup>3</sup> et Anderson <sup>4</sup> supposent aussi que la masse de l'électron restant constante, c'est sa charge ou plutôt l'action électro-dynamique de sa charge qui varie:  $m = \text{cons.}$ ,

$$e = e_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

W. Ritz <sup>5</sup> pense qu'au lieu d'une masse devenant infinie lorsqu'on approche de la vitesse de la lumière, nous aurions pu très bien avoir des forces qui s'annulent parce qu'elles se propagent précisément avec la vitesse de l'électron mobile. Prunier <sup>6 7 8</sup> adhère à ce point de vue, en admettant qu'en réalité c'est la force appliquée qui varie.

Il ne faut pas oublier que les formules qui donnent la forme dont varie la masse longitudinale en fonction de la vitesse ne reposent jusqu'ici sur aucune base expérimentale et nous pouvons admettre que si cette variation existe, elle peut être expliquée conformément à la conception originale de Thomson

<sup>1</sup> L. T. MORE, *Phil. Mag.* (6), 21, 208, 1911; W. F. G. SWANN, *Ibid.*, p. 733.

<sup>2</sup> MORE, *ibid.*, p. 216.

<sup>3</sup> G. V. GLEICH, *Ann. der Physik* (4), 83, 247, 1927.

<sup>4</sup> W. ANDERSON, *Ann. der Physik* (4), 85, 494, 1928.

<sup>5</sup> W. RITZ, *Ann. Chim. Phys.* (8), 13, 194, 1908.

<sup>6</sup> F. PRUNIER, *Essai d'une Physique de l'éther*, Paris, Librairie scientifique. A. Blanchard, 1932, ch. I, § IX, p. 26.

<sup>7</sup> F. PRUNIER, *Newton, Maupertuis et Einstein, Réflexions à propos de la relativité*, Paris, 1929, ch. IV, § VII, p. 62.

<sup>8</sup> F. PRUNIER, *Archives des sciences*, Genève, 1, 102, 1948.

et de Poincaré par l'intervention de sortes de résistances extérieures au mouvement des corps.

Dans le domaine de l'hydrodynamique nous avons l'expérience de Cook <sup>1</sup> qui, en faisant tomber dans l'eau une sphère d'environ 1 mètre de diamètre, suspendue à un fil relié à un tambour qui permettait d'enregistrer le mouvement, a trouvé une augmentation de la résistance égale à 0,46 fois le déplacement du corps. L'équation du mouvement étant

$$M' \frac{dv}{dt} = F - kv''$$

où  $M'$  = inertie du corps,  $v$  = vitesse,  $F$  = force verticale due à la gravitation,  $kv''$  = un terme qui exprime la résistance de frottement au mouvement du corps dans le liquide, le résultat de cette expérience concorde suffisamment avec la théorie de Stokes, rappelée au début de ce chapitre, relative à l'augmentation apparente de la masse des sphères mobiles dans un liquide parfait.

Par contre, dans le domaine de l'électro-dynamique, tout ce que l'expérience a pu montrer, est relatif à la masse dite transversale, c'est-à-dire au cas où la force est appliquée perpendiculairement au mouvement de l'électron. Si nous admettons que le mouvement lui-même est le fait d'une première force appliquée à l'électron dans le sens de son déplacement, nous nous trouvons là en présence de deux forces dirigées perpendiculairement l'une sur l'autre et le problème à résoudre se ramène à une simple question de composition des forces.

Dans notre étude consacrée à la force centrifuge ou la force d'inertie, nous avons montré qu'en appliquant le principe de la composition des forces, on arrivait à représenter d'une manière commode les phénomènes attribués à des forces fictives, dites forces centrifuges. En faisant une nouvelle application de ce principe de la composition des forces, nous verrons qu'on peut se rendre parfaitement compte de la variation apparente des masses en fonction de la vitesse.

<sup>1</sup> G. COOK, *Philosoph. Mag.* (5), 39, 350, 1920.

Descartes avait cherché déjà à faire un rapprochement entre les effets produits par les chocs, c'est-à-dire par l'arrêt brusque des masses inertes en mouvement et ceux produits par la pesanteur, c'est-à-dire dus à des masses pesantes au repos et il avouait que seule l'expérience était juge en cette matière. Il écrivait en effet à Mersenne à la date du 11 mars 1640: « Je ne puis dire combien il faut de pesanteur pour égaler la force d'un coup de marteau; car c'est une question de fait, où le raisonnement ne sert de rien sans l'expérience. »<sup>1</sup>

Ce rapprochement tenté par Descartes rappelle singulièrement celui de la relativité connu sous le nom de principe d'équivalence qui identifie la masse pesante à la masse inerte.

Mariotte, de son côté et conformément aux conceptions fondamentales de la mécanique cartésienne, établissait une comparaison entre un choc et la pression d'un poids et cherchait à trouver, par l'expérience, le poids et le choc capables d'écraser le même canon de verre.

« Mettez sur un marbre bien uni situé horizontalement, un de ces petits canons longs de 2 pouces et épais de 2 lignes; chargez le d'un fer ou d'un autre corps dur et poli, et y ajoutez des poids jusqu'à ce que le verre puisse être écrasé. Laissez tomber ensuite d'une médiocre hauteur sur un pareil bout de verre posé de même sur le même arbre un poids de fer ou de cuivre plat et uni en sa surface inférieure, situé horizontalement, et augmentez ce poids jusqu'à ce qu'il écrase le verre. Or, si par exemple, il falloit 400 livres de poids pour écraser le petit cylindre, et que laissant tomber de 7 pouces un poids de 2 livres 2 onces, il s'en écrasât un semblable; on feroit cette analogie, comme 400 est à 2 livres  $\frac{1}{8}$ , ainsi une vitesse à parcourir 830 lignes en une seconde (qui est la vitesse qu'acquiert à peu près un poids de 2 livres 2 onces de fer, d'une hauteur de

<sup>1</sup> *Œuvres de Descartes*, publiées par Charles ADAM et Paul TANNERY, Correspondance, III, Paris, Léopold Cerf, imprimeur-éditeur, 1899, p. 34; *Descartes*, Correspondance publiée avec une introduction et des notes par Ch. Adam et G. MILHAUD, t. 4, Les Presses universitaires, Paris, 1947, p. 36; *Introduction à l'étude des théories de la mécanique*, par H. BOUASSE, Paris, Georges Carré, 1895, Ch. IX, § III, p. 206.

7 pouces) est à 4 lignes et un peu plus, d'où vous pourrez juger que la première vitesse d'un poids de 400 livres, qui commence à tomber dans un air calme, est telle qu'il pourroit faire 4 lignes en une seconde, s'il continuoit à se mouvoir uniformément selon cette première vitesse. On a fait cette expérience et plusieurs autres semblables, lesquelles ont donné à connoître cette première vitesse de pouvoir faire à peu près 4 lignes en une seconde. »<sup>1</sup>

Mais maintenant que les notions de masse inerte et de masse pesante ont été bien clairement dégagées et définies, rien ne nous empêche d'établir, par l'expérience, une comparaison entre l'effet d'une masse inerte au repos et l'effet dû à la perte d'énergie cinétique par l'arrêt brusque d'une masse inerte en mouvement et de déterminer, à l'aide de la balance, la quantité d'une masse inerte tombant d'une hauteur déterminée sur le plateau d'une balance capable d'équilibrer une masse supérieure à la première et placée dans le deuxième plateau, en fonction de la hauteur de la chute, c'est-à-dire de la vitesse de la première masse.

En faisant cette expérience, nous pouvons constater que si l'on pose sur le plateau d'une balance un poids de 10 grammes par exemple, et sur l'autre un poids de 9 g 50, la balance penche du côté du poids le plus lourd. Mais si, au lieu de placer ces 9 g 50 sur le plateau, on les fait tomber d'une certaine hauteur, l'équilibre se fait entre les deux plateaux, comme si le mouvement de chute avait donné à ces poids de 9 g 50 un supplément de poids ou de masse de 0 g 50. Si l'on augmente davantage la hauteur de la chute, on peut diminuer autant le poids devant faire équilibre avec les 10 grammes de l'autre plateau.

Cette notion de l'équivalence de l'énergie cinétique acquise dans le mouvement à une masse inerte supplémentaire étant ainsi dégagée par l'expérience banale de la balance, nous pou-

<sup>1</sup> *Œuvres de Mr Mariotte, de l'Académie royale des sciences, divisées en deux tomes.* Tome premier, A Leyde, chez Pierre Vander, Aa, MDCCXVII, « Traité de la percussion ou choc des corps », II<sup>e</sup> partie, proposition XI, p. 80; BOUASSE, *Introduction à l'étude des théories, etc.*, p. 217.

vons passer à l'étude des principes dynamiques de cette notion en choisissant comme exemple le cas de l'électron.

On sait que la déviation d'un électron dans un champ magnétique ou un champ électrique étant proportionnelle à la charge et inversement proportionnelle à la masse, ces déviations ont pour expressions

$$x = \frac{heb}{m\nu^2}, \quad y = \frac{Hea}{m\nu} \quad (1)$$

formules dans lesquelles  $x$  = déviation électrique,  $y$  = déviation magnétique,  $h$  et  $H$  sont les intensités des champs respectifs,  $e$  = la charge de l'électron,  $m$  = sa masse,  $a$  et  $b$ , deux constantes de l'appareil. On sait également que si l'on augmente la vitesse, la déviation diminue, ce que l'on a pu interpréter en admettant que la masse de l'électron en mouvement augmente avec la vitesse, d'après les formules (1). Or la trajectoire de l'électron, après sa déviation, est la résultante de la trajectoire primitive et de la trajectoire qu'il eût suivi s'il eût été uniquement soumis à l'influence du champ. La nouvelle trajectoire suivie par l'électron, qui représente la déviation, est en effet due au concours de deux mouvements que l'électron effectue sous l'influence de deux forces. L'une de ces forces est représentée par les forces magnétique ou électrique et dont les intensités sont données par les valeurs  $H$  ou  $h$  des champs respectifs. L'autre force est celle qui a communiqué à l'électron sa vitesse initiale. Dans le cas des corps radioactifs, cette force tire son origine de la rupture de l'édifice atomique par suite de la désintégration, tandis que dans le cas des rayons cathodiques, elle se présente sous forme d'une tension dont l'intensité est exprimée par la valeur  $V$  du potentiel de décharge qui a mis l'électron en mouvement. La détermination de la vitesse s'obtient en effet au moyen de l'équation

$$Ve = \frac{1}{2} m\nu^2, \quad (2)$$

équation reliant la charge  $e$ , la masse cinétique  $m$  et la vitesse  $\nu$  d'un électron ou corpuscule cathodique au potentiel de dé-

charge  $V$  dans le tube. On en tire :

$$v = \sqrt{2V \frac{e}{m}} . \quad (3)$$

L'augmentation de la vitesse  $v$  de l'électron montre qu'on a augmenté la force  $V$  qui imprime à l'électron sa vitesse et si

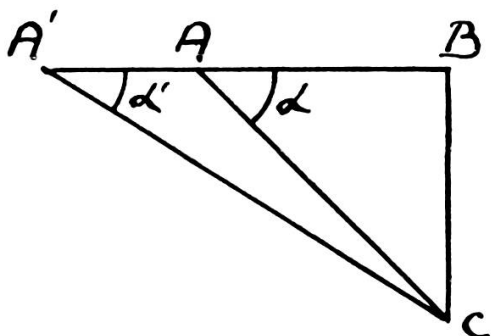


Fig. 1.

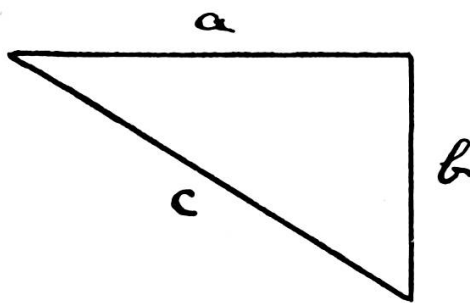


Fig. 2.

nous supposons deux forces  $AB$  et  $BC$  (fig. 1), dirigées perpendiculairement l'une sur l'autre, lorsque nous augmentons la force  $AB$  d'une certaine quantité  $AA'$ , l'angle  $\alpha'$  que fait la force résultante avec cette nouvelle force  $A'B$  est plus petit que l'angle  $\alpha$  que faisait la première force résultante  $AC$  avec la force  $AB$ . Par conséquent la particule qui suit la direction de la force résultante et qui, auparavant, avait une déviation  $\alpha$  par rapport à sa trajectoire primitive, ne manifeste plus qu'une déviation  $\alpha'$ , plus petite qu' $\alpha$  par rapport à son ancienne trajectoire, ce qui peut être considéré comme une augmentation de sa masse, proportionnelle à la diminution de la déviation en fonction de la vitesse de la particule.

Calculons l'action de la force magnétique  $H$ , par exemple, sur les effets de la force  $V$ .

Les accélérations, ou les vitesses initiales quand il s'agit d'un mouvement rectiligne et uniforme sous l'influence de forces qui ont cessé d'agir, étant proportionnelles aux forces, prenons la ligne  $a$  (fig. 2) proportionnelle à la vitesse initiale de l'électron. Cette vitesse que l'électron prend au moment de sa projection dans l'espace sous l'influence d'un potentiel de décharge  $V$ , est elle-même proportionnelle à ce potentiel. Prenons

aussi la ligne  $b$  proportionnelle à la force magnétique qui dévie l'électron, force proportionnelle à son tour au champ magnétique  $H$ . La résultante  $c$  représente l'intensité de la force à laquelle l'électron se trouve être soumis; elle représente en même temps la vitesse et la direction du mouvement de l'électron, parce qu'elle résulte de la composition des deux mouvements effectués par le mobile sous l'influence des deux forces conjuguées  $a$  et  $b$ , normales l'une sur l'autre. Sa longueur est proportionnelle par conséquent à la force résultante due à la composition des forces  $a$  et  $b$ .

Le triangle rectangle  $abc$  donne:  $c^2 = a^2 + b^2$ , d'où  $b^2 = c^2 - a^2$  et, par conséquent:

$$b = \sqrt{c^2 - a^2} = c \sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}} = c \sqrt{1 - \beta^2}$$

en posant:  $\beta = \frac{a}{c}$ .

Donc  $b = c \sqrt{1 - \beta^2}$ .

Ainsi l'existence de la vitesse initiale  $a$  de l'électron entraîne la nécessité d'augmenter la force déviatrice  $b$  dans le rapport de  $\sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}}$  à 1, c'est-à-dire d'une manière d'autant plus importante que cette vitesse initiale elle-même est plus élevée, ce que l'on peut traduire en disant que tout se passe comme si, par suite de cette vitesse initiale, la masse avait augmenté dans cette même proportion. En effet, si cette vitesse initiale est nulle, alors  $b = c$ . Au contraire, pour les électrons de très grandes vitesses, qui se rapprochent de la vitesse de la lumière, le coefficient  $\sqrt{1 - \beta^2}$  se rapproche singulièrement du coefficient de Lorentz, dans lequel  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $v$  étant la vitesse de l'électron et  $c$  la vitesse de la lumière. Lorsque l'électron n'a pas de vitesse propre,  $b$  et  $c$  sont confondus; toute action mécanique sur l'électron est produite par la force  $b$ . Mais, dès que la vitesse propre  $a$  de l'électron commence à intervenir, on a une nouvelle force déviatrice composée  $c$ , laquelle pour pouvoir produire le même effet que la force  $b$  sur le mouvement de l'électron, doit être augmentée dans le rapport de  $\sqrt{1 - \beta^2}$ .

*Conclusions générales.*

Dans un article précédent <sup>1</sup>, nous avons soumis à un examen critique serré le fameux postulat de la Relativité sur la constance de la vitesse de la lumière dans le vide et montré qu'aucune observation astronomique ne parlait en sa faveur et qu'il ne reposait non plus sur aucun fait expérimental. Bien plus, nous avons prouvé que ce principe de la relativité restreinte était en contradiction évidente avec le principe d'équivalence de la relativité généralisée.

Nous avons vu dans ce travail qu'après avoir admis l'identité de la masse pesante et de la masse inerte, le principe d'équivalence a établi, comme corollaire, une relation entre l'énergie et la masse en attribuant à l'énergie elle-même une masse inerte doublée d'une masse pesante. Ce principe a eu pour conséquence l'admission de l'augmentation de la masse en fonction de son énergie et, si le corps est en mouvement, l'augmentation de sa masse en fonction de son énergie cinétique, c'est-à-dire sa vitesse.

Dans notre travail actuel, consacré entièrement à l'examen approfondi de cette importante notion, nous montrons tout d'abord que, historiquement, la notion de l'augmentation de la masse en fonction de sa vitesse a pris tout d'abord naissance, en dehors de toute préoccupation relativiste, par des considérations tirées de certaines analogies que l'on trouve entre le mouvement des corps chargés dans des champs électrique ou magnétique et le mouvement des corps solides dans des fluides parfaits.

On a reconnu par la suite que la résistance que les corps en mouvement opposent à tout changement de leur vitesse n'était pas la même suivant que ce changement avait lieu dans la direction même de son mouvement ou perpendiculairement à cette direction. On a été amené ainsi à la notion d'une masse transversale, différente de la masse longitudinale, la première étant d'ailleurs seule accessible à l'expérience.

<sup>1</sup> J. SIVADJIAN, *Arch. des Sciences phys. et natur.*, Genève, (5), 29, 356, 1947.

Ce n'est que longtemps après que la théorie de la relativité a prétendu donner l'explication de cette augmentation de la masse des corps en mouvement par des arguments tirés de la relativité générale, fondée sur le principe d'équivalence.

Après avoir donné par conséquent un exposé complet et fidèle de tous les faits expérimentaux concernant l'augmentation de la masse transversale au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse des corps en mouvement et confronté les conclusions souvent contradictoires que l'on a pu dégager de ces expériences délicates, nous montrons que cette augmentation purement apparente n'est en réalité qu'une manifestation de la loi de la composition des vitesses que l'on peut rendre facilement explicite par la règle classique du parallélogramme.

---