

# Le chemin historique vers la théorie de la relativité et les concepts de temps

Mayeul Arminjon

*Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000 Grenoble, France.*

E-mail: mayeul.arminjon@3sr-grenoble.fr

Texte d'un exposé présenté à l'Académie de Savoie,  
Chambéry, le 18 décembre 2024

**Résumé.** La théorie de la relativité, dans son interprétation dominante, a changé profondément les concepts d'espace et de temps — surtout en montrant que la simultanéité, telle qu'on la définit opératoirement, n'est pas une notion absolue. On ne sait plus, alors, ce qu'est "le présent". Il existe une autre interprétation, due à Lorentz et Poincaré, qui conserve le concept classique du temps et considère les effets "relativistes" comme absolus, dus à un mouvement par rapport à un référentiel privilégié ou "éther". On rappelle ici que la théorie de la relativité, dans sa genèse historique, a été d'abord trouvée dans cette version, par Lorentz, Poincaré et d'autres chercheurs très talentueux. Ceci concerne le cas où l'on néglige l'effet du champ de gravitation ("relativité restreinte"). Il existe cependant une théorie alternative de la gravitation qui étend cette "interprétation de Lorentz-Poincaré" au cas général.

## 1 Introduction

La théorie de la relativité est la théorie érigée au début du vingtième siècle, et capitale dans la physique d'aujourd'hui, qui a rendu les lois de l'électromagnétisme compatibles avec le Principe de Relativité. Ce dernier stipule que les lois de la physique sont les mêmes, indépendamment de l'état de mouvement *uniforme* d'un système physique. Autrement dit, les mêmes lois de la physique sont observées, que ce soit dans un laboratoire fixe à la surface de la Terre <sup>1</sup> ou dans un laboratoire en translation à vitesse constante par rapport au premier. Le Principe de Relativité était déjà valide pour la mécanique newtonienne classique. Mais les théories de l'électromagnétisme de la fin du dix-neuvième siècle devaient postuler la présence universelle d'un milieu de

---

<sup>1</sup> (en négligeant le mouvement de la Terre autour d'elle-même et autour du Soleil, qui est assez proche d'être uniforme aux échelles de temps et d'espace pertinentes pour beaucoup de phénomènes usuels)

propagation des ondes électromagnétiques, l'éther, dont on avait peine à comprendre le mouvement par rapport aux laboratoires terrestres où l'on réalisait des expériences. Les physiciens de cette époque en sont peu à peu arrivés, surtout à la suite des analyses de Poincaré, à penser que ce qui était en cause était le fait que ces théories n'étaient pas en accord avec le Principe de Relativité — tandis que les expériences étaient en accord avec ce principe. Les physiciens ont résolu cette énigme en construisant une théorie qui obéissait au Principe de Relativité et contenait à la fois la mécanique et l'électromagnétisme: la théorie de la relativité.

Dans l'exposé qui suit, je vais tenter, d'abord, de résumer très brièvement le développement de la physique qui a conduit à cette énigme, puis, toujours en me limitant aux points cruciaux, de retracer la façon dont quelques physiciens très doués ont progressivement réussi à la résoudre. Il s'agira donc principalement d'un exposé historique et pédagogique, mais quelques remarques plus proches de la recherche seront faites, notamment aux §§5.2, 6.2, 9.2.

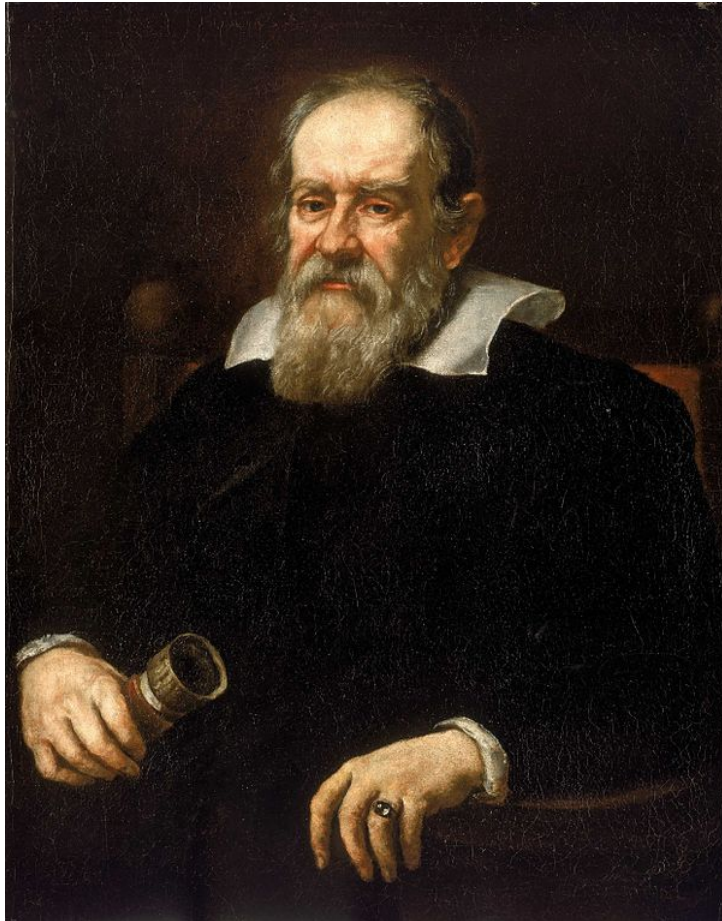


Figure 1: Galileo Galilei (1564-1642), portrait par Giusto Sustermans

## 2 La relativité galiléenne

Galilée a contribué de façon essentielle à l'avènement de la mécanique classique, formulée ensuite plus complètement par Newton. En particulier, Galilée a expliqué de façon très détaillée ce que nous appelons maintenant la *relativité galiléenne*, c'est à dire le Principe de Relativité appliqué à la mécanique classique — explication qu'il résumait par la formule: "Le mouvement (*uniforme*) est comme rien", illustrée sur la figure 2.

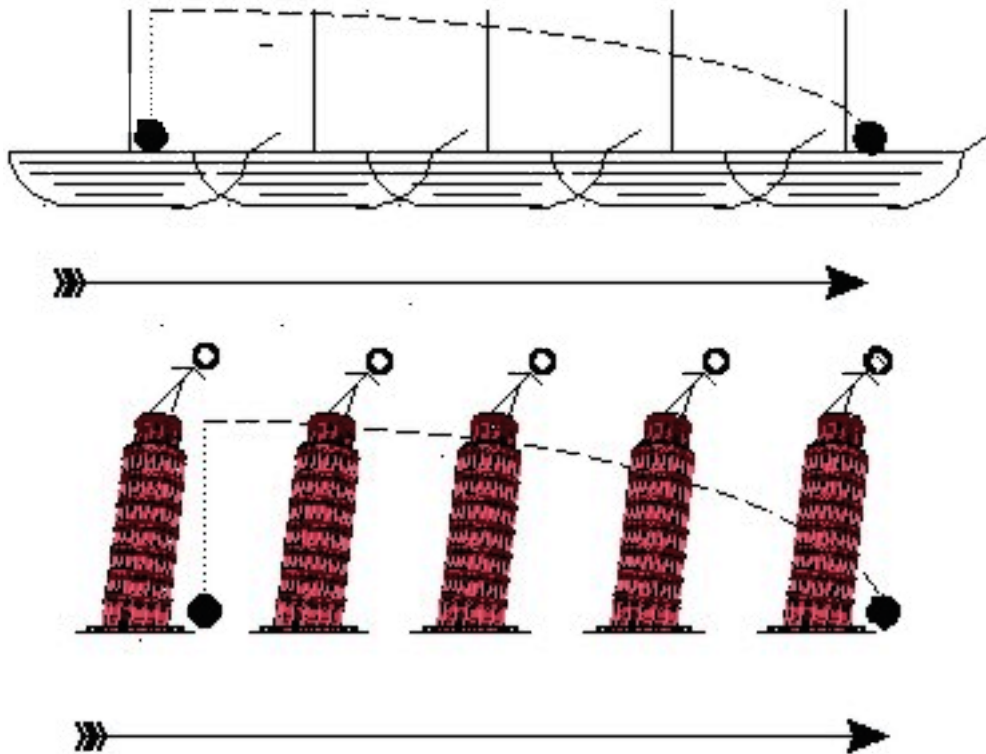


Figure 2: Vu depuis le bateau en mouvement, le ballon tombe à la verticale du mât, comme lorsque le bateau est à l'arrêt. Vu depuis le quai, il suit une parabole. Idem pour la Tour de Pise, en mouvement par rapport aux astres. (Par contre un ballon lâché depuis un manège sort du manège.)

(Image: © Stanford Encyclopedia of Philosophy)

## 3 La lumière comme phénomène ondulatoire

Au début du dix-neuvième siècle, la description de la lumière comme *ondulatoire* s'impose face à la théorie corpusculaire de Newton : Thomas Young avec son expérience

de diffraction de la lumière à travers deux fentes, Augustin Fresnel avec son expérience de diffraction de la lumière par un fil, obtiennent des *franges d'interférence*: la superposition des ondes les renforce ou les affaiblit selon leur phase relative (Figs. 4 et 5).

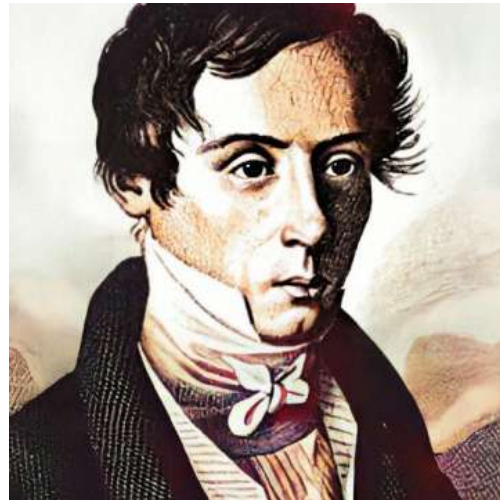


Figure 3: Thomas Young (1773-1829), Augustin Fresnel (1788-1827)

## 4 L'électromagnétisme

### 4.1 Les débuts de l'électromagnétisme : Ørsted, Ampère, Faraday

Après les débuts de l'électricité au dix-huitième siècle (électricité statique, condensateurs, piles,...), les physiciens découvrent au début du dix-neuvième siècle l'*électromagnétisme*, c'est-à-dire le couplage entre les phénomènes électriques et magnétiques. En 1820, le physicien danois Hans-Christian Ørsted (d'ailleurs ami de Hans-Christian Andersen, l'auteur des contes universellement connus) observe qu'un circuit électrique produit un champ magnétique, qui dévie l'aiguille d'une boussole. Ses résultats sont théorisés par le physicien français André-Marie Ampère sous la forme du théorème d'Ampère, qui égale une certaine intégrale (la "circulation") du champ magnétique sur un circuit fermé, à la somme algébrique des courants qui traversent la surface



Figure 4: Interférence d'ondes à la surface de l'eau (Photo: Markus Pössel)

délimitée par ce circuit. Ces résultats sont très importants en pratique puisqu'ils expliquent le fonctionnement des bobines électriques. En 1831, l'Anglais Michael Faraday découvre qu'inversement un champ magnétique variable produit une tension électrique : c'est l'induction électromagnétique, elle aussi extrêmement importante en pratique puisqu'elle sous-tend notamment le fonctionnement des générateurs et des transformateurs électriques, et des plaques à induction.

## 4.2 La théorie de l'électromagnétisme : Maxwell et ses équations

En 1861, le physicien écossais James Clerk Maxwell formule un cadre théorique qui *unifie l'électricité et le magnétisme* : les *équations de Maxwell*, aujourd'hui l'un des piliers de la physique théorique mais aussi de la physique appliquée. Il s'agit d'un système linéaire d'équations aux dérivées partielles, qui relie les dérivées premières des champs électrique et magnétique aux sources de ces champs, lesquelles sont les densités volumiques de la charge et du courant électriques. L'une de ces équations est l'équation dite de Maxwell-Ampère, qui, dans un cas particulier important (le régime statique, où le champ électrique ne dépend pas du temps), est équivalente au théorème d'Ampère mentionné ci-dessus. Une autre de ces équations est l'équation dite de Maxwell-Faraday, qui décrit le phénomène d'induction, lui aussi évoqué ci-dessus.

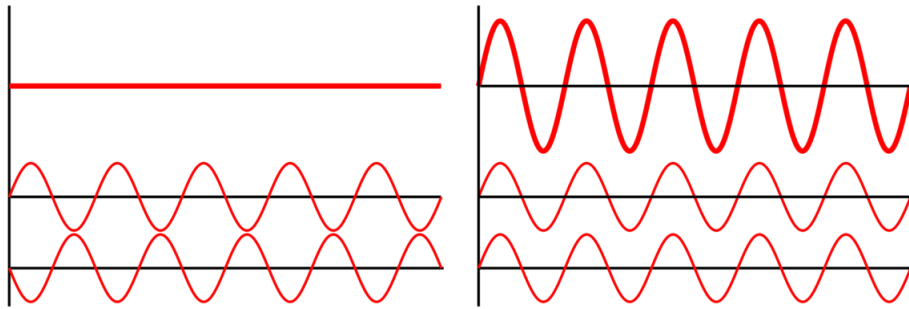


Figure 5: Interférence d'ondes : Si les deux ondes sont en opposition de phase, leurs amplitudes se soustraient ("interférence destructive", à *gauche*). Si les deux ondes sont en phase, leurs amplitudes s'additionnent ("interférence constructive", à *droite*). (Auteur de la figure : Utilisateur Wiki Haade.)

Dans un article de 1864, Maxwell montre que ses équations prédisent des *ondes électromagnétiques*, c'est-à-dire des champs électrique et magnétique oscillant dans le temps et dans l'espace, de façon couplée. Ces ondes se propageraient à une vitesse que l'on peut calculer et que Maxwell trouve à peu près égale à celle de la lumière. Il en déduit ceci : "L'accord des résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme." Il faisait ainsi de l'optique un sous-domaine de l'électromagnétisme. Cette prédiction, très audacieuse à l'époque, s'est révélée exacte, comme nous allons le rappeler ci-dessous.

### 4.3 Hertz et la découverte des ondes électromagnétiques

De 1886 à 1889, le physicien allemand Heinrich Hertz réalise des expériences qui produisent effectivement des ondes électromagnétiques (de fréquence "radio", environ 50 MHz) et trouve qu'en effet ces ondes se propagent à la vitesse de la lumière ( $c \simeq 300\,000$  km/s). Il réalise par la suite d'autres expériences, qui montrent notamment que ces ondes peuvent être concentrées par un miroir concave, et aussi être diffractées, exactement comme la lumière. Il est inutile en 2025 d'insister sur la portée gigantesque de cette découverte dont les applications imprègnent complètement notre vie, mais il est amusant de noter que Hertz lui-même ne pensait pas que sa découverte puisse avoir des applications ! Il est vrai qu'il n'a malheureusement pas eu le temps de voir le début de ces applications. En son honneur, les ondes électromagnétiques sont souvent appelées "ondes hertziennes", et l'unité internationale de fréquence est le *Hertz* (en abrégé Hz), c'est-à-dire une vibration d'une période par seconde.

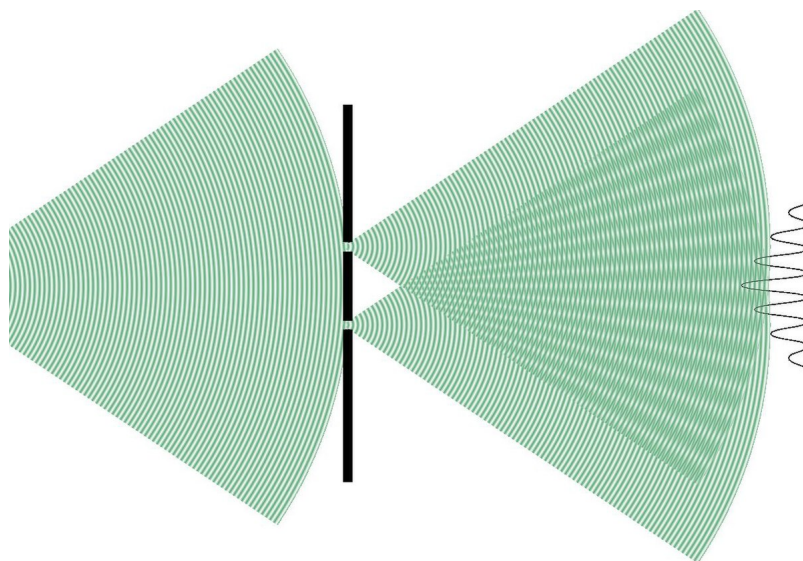


Figure 6: L'expérience des fentes d'Young: Principe

#### 4.4 L'éther, support des ondes électromagnétiques

Comme les ondes de surface dans l'eau, les ondes électromagnétiques (et lumineuses) devraient avoir un support : elles devraient manifester la vibration de quelque chose. C'est pourquoi les physiciens du dix-neuvième siècle admettaient l'existence d'un milieu de propagation pour les ondes électromagnétiques : *l'éther*.<sup>2</sup> Ce milieu devait remplir l'espace, puisque les télescopes reçoivent les ondes lumineuses émises par les objets astronomiques éloignés. Il ne devait pas imposer de résistance au mouvement, puisqu'une telle résistance n'est pas observée, en particulier dans le mouvement des planètes qui dure depuis de nombreux millions d'années. Diverses hypothèses sur la nature physique de ce milieu étaient envisagées, et ce point faisait l'objet de nombreux travaux et discussions [1].

Depuis les travaux de Lorentz [2, 3], qui à l'époque fournissaient la théorie la plus convaincante de l'électrodynamique, l'éther avait été dépouillé de toute propriété physique : il était vu comme un *référentiel inertiel*, donc rigide. Rappelons qu'en physique, un *référentiel* est un cadre pour décrire le mouvement des objets, par exemple les murs et l'horloge d'un laboratoire où l'on étudie la chute des corps avec ou sans vitesse initiale. Toutefois, notamment en mécanique classique mais aussi dans la théorie de la relativité ("restreinte", voir plus bas), on souhaite que ce cadre soit essentiellement sans limite spatiale ; autrement dit, on préfère considérer des référentiels globaux. Ainsi, on parlera du "référentiel terrestre", dont l'origine est au centre de

<sup>2</sup> Ce nom est tiré du grec *Αἰθήρ* / Aither, qui désigne "un dieu primordial dans la mythologie grecque de l'Antiquité" ; ce dieu "personnifie la partie supérieure du ciel, le domaine des autres dieux, la lumière céleste" (Wikipedia).

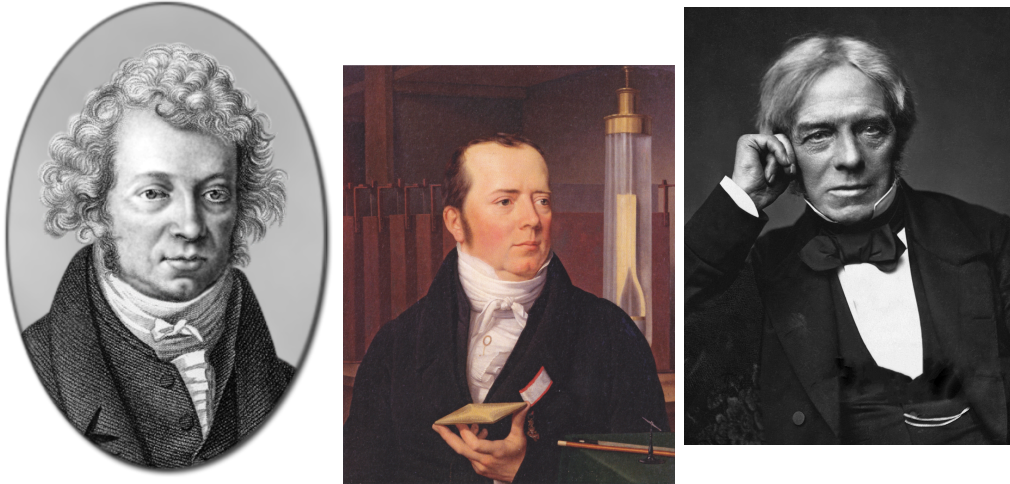


Figure 7: Ampère (1775-1836) Ørsted (1777-1851) Faraday (1791-1867)



Figure 8: James Clerk Maxwell (1831-1879)

la Terre et dont les axes sont liés au globe terrestre mais vont “jusqu’à l’infini” : un tel référentiel prolonge le référentiel du laboratoire évoqué ci-dessus. Un référentiel *inertiel* est, en gros, un référentiel dépourvu de rotation et d’accélération. De façon plus précise, c’est un référentiel dans lequel les lois de la mécanique classique, et en particulier le principe fondamental de la dynamique, s’appliquent : la force qui agit sur un point matériel est égale à la masse de ce point matériel, multipliée par son accélération — sans avoir à ajouter l’accélération (locale) du référentiel lui-même, c’est-à-dire sans avoir à ajouter les forces d’inertie comme la force centrifuge.

L’hypothèse de Lorentz, que le référentiel de l’éther était un référentiel inertiel, impliquait que la Terre devait avoir un mouvement (de rotation et de translation) par rapport à l’éther : la Terre a une vitesse d’environ 30 km/s dans son orbite autour du Soleil, et, comme chacun sait, effectue une rotation complète autour de l’axe des pôles





Figure 9: Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)

en environ 24 heures... Il devait donc *a priori* être possible de détecter le mouvement d'un laboratoire par rapport à l'éther.

## 5 L'énigme

### 5.1 L'échec de la détection du mouvement de l'éther

Dans la deuxième moitié du dix-neuvième siècle, diverses expériences tentent de déceler le mouvement d'un laboratoire par rapport au référentiel de l'éther (ou, ce qui revient au même, de déceler le mouvement du référentiel de l'éther par rapport à un laboratoire), mais elles ont toutes des résultats négatifs : tout se passe comme si le laboratoire était au repos par rapport à l'éther — ce qu'on appelait "l'entraînement total" de l'éther par la Terre. Mais ceci, d'une part, n'est pas compatible avec l'hypothèse privilégiée, à la suite des travaux de Lorentz, selon laquelle l'éther serait un référentiel inertiel : bien entendu, le laboratoire étant lié à la Terre, cet entraînement total contredit le caractère inertiel du référentiel de l'éther. Il contredit même la rigidité de ce référentiel. <sup>3</sup> D'autre part, un entraînement total de l'éther rendrait impossible d'interpréter le phénomène observé de "l'aberration des étoiles" comme dû au mouvement de la Terre par rapport à l'éther [2].

---

<sup>3</sup> Il semblerait absurdement anthropocentrique et physiquement impossible que le référentiel de l'éther soit lié à la Terre et tourne avec elle "jusqu'à l'infini". Donc, dans l'hypothèse de l'entraînement total, il devrait y avoir quand on s'éloigne de la Terre une transition pour arriver à une zone où le référentiel de l'éther ne tourne plus avec la Terre. Ainsi ce référentiel ne serait pas rigide.

## 5.2 L'expérience de Michelson-Morley et son analyse avec l'éther de Lorentz

En 1887, l'expérience des physiciens américains Michelson et Morley [4], utilisant l'interférence des ondes lumineuses, aurait dû montrer — en tout cas selon l'hypothèse de Lorentz concernant le référentiel de l'éther — un déplacement des franges d'interférence lorsqu'on tourne l'interféromètre.

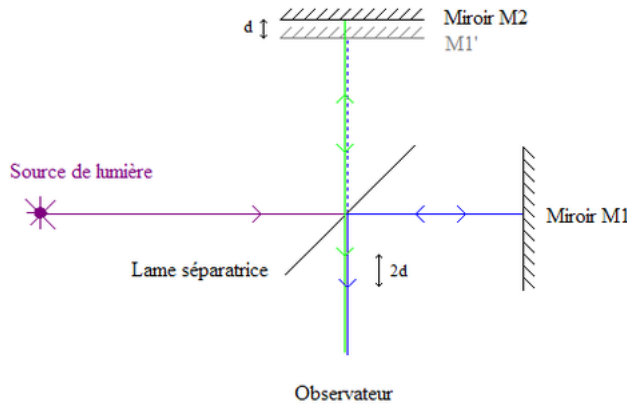


Figure 10: Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson

En effet le temps d'aller-retour  $T_1$  ou  $T_2$  du signal lumineux entre le miroir  $M_1$  ou le miroir  $M_2$  et le centre de la lame séparatrice semi-transparente (cf. Fig. 10) détermine le nombre de longueurs d'onde parcourues ( $N = cT/\lambda$  avec  $T = T_1$  ou  $T = T_2$ )<sup>4</sup>, donc (selon la position de  $N$  par rapport aux deux entiers les plus proches) la phase de l'onde. La différence  $T_1 - T_2$  détermine donc la nature destructive ou constructive de l'interférence. Or ce temps d'aller-retour varie en fonction de l'angle entre le trajet lumineux rectiligne et le vecteur vitesse  $\mathbf{V}$  de l'interféromètre (lié à la Terre) par rapport à l'éther — comme nous allons le voir.

Nous notons  $\mathcal{E}$  le référentiel de l'éther, qui est ici simplement *un référentiel rigide dans lequel les signaux lumineux se propagent à la vitesse  $c$  dans toutes les directions*. Et nous notons  $\mathcal{E}_{\mathbf{V}}$  le référentiel (rigide lui aussi) qui est animé d'un mouvement de translation uniforme par rapport à  $\mathcal{E}$ , la vitesse de cette translation étant le vecteur  $\mathbf{V}$ . Nous prenons l'axe des abscisses (axe  $Ox$ , dans le référentiel  $\mathcal{E}$ ) parallèle à  $\mathbf{V}$ , les axes  $Oy$  et  $Oz$  étant donc perpendiculaires à  $\mathbf{V}$ . Le temps  $t$  est le temps mesuré par des horloges liées au référentiel  $\mathcal{E}$ , synchronisées selon la procédure classique proposée par Poincaré (voir Section 7). Les temps d'aller-retour  $T_1$  et  $T_2$  mentionnés plus haut (qui ne correspondent pas à des boucles spatiales dans le référentiel  $\mathcal{E}$  et exigent donc

<sup>4</sup> Ici  $\lambda$  est la longueur d'onde du rayonnement lumineux utilisé, supposé monochromatique.

en effet de disposer d'horloges synchronisées) sont mesurés avec ce temps.

Voyons d'abord le cas d'un trajet lumineux *parallèle* à  $\mathbf{V}$  (Fig. 11).

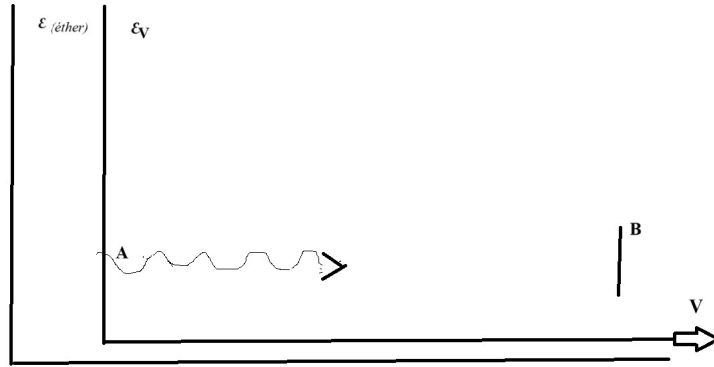


Figure 11: Cas d'un trajet parallèle à  $\mathbf{V}$

Le signal lumineux  $S$  part à  $t = 0$  de A, situé à l'origine des coordonnées ( $x = y = z = 0$  à  $t = 0$ ), vers B qui est à la position ( $x = d, y = z = 0$ ) à  $t = 0$ . Les points A et B sont liés au référentiel  $\mathcal{E}_V$ , autrement dit ils sont tous deux en mouvement à la vitesse  $\mathbf{V}$  par rapport à  $\mathcal{E}$ , et nous avons choisi les axes de telle sorte que seule la composante  $V_x$  de  $\mathbf{V}$  soit non nulle, soit  $V_x = V$ . Quand  $S$  arrive en B à l'instant  $t$ , la position de B dans  $\mathcal{E}$  est donc définie par l'abscisse  $x = d + Vt$ , les deux autres coordonnées,  $y$  et  $z$ , étant restées nulles. Comme le signal va à la vitesse  $c$  dans  $\mathcal{E}$  et est parti de l'origine à  $t = 0$  en suivant l'axe  $Ox$ , cette même position est  $x = ct$ ; donc  $d + Vt = ct$  d'où  $t = \frac{d}{c-V}$ . De même pour le trajet de B vers A, le temps est  $t' = \frac{d}{c+V}$ . Dans ce cas d'un trajet lumineux parallèle à  $\mathbf{V}$ , le temps d'aller-retour du signal lumineux entre A et B est donc

$$T = t + t' = \frac{d}{c-V} + \frac{d}{c+V} = \frac{2d}{c} \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (1)$$

Voyons maintenant le cas d'un signal lumineux *perpendiculaire* à  $\mathbf{V}$  (Fig. 12).

Le signal lumineux  $S$  part à  $t = 0$  de A, situé à  $x = y = z = 0$ , vers B situé à  $x = 0, y = d, z = 0$  (ces deux positions sont valables à  $t = 0$ ). Quand  $S$  arrive en B à  $t$ , la position de B dans  $\mathcal{E}$  est ( $x = Vt, y = d, z = 0$ ). La distance  $\Delta$  parcourue par  $S$  dans  $\mathcal{E}$  est donc telle que

$$\Delta^2 = x^2 + y^2 = V^2 t^2 + d^2$$

Comme le signal va à la vitesse  $c$  dans  $\mathcal{E}$ , on a donc

$$V^2 t^2 + d^2 = (ct)^2, \quad \text{soit} \quad t = \frac{d}{\sqrt{c^2 - V^2}}.$$

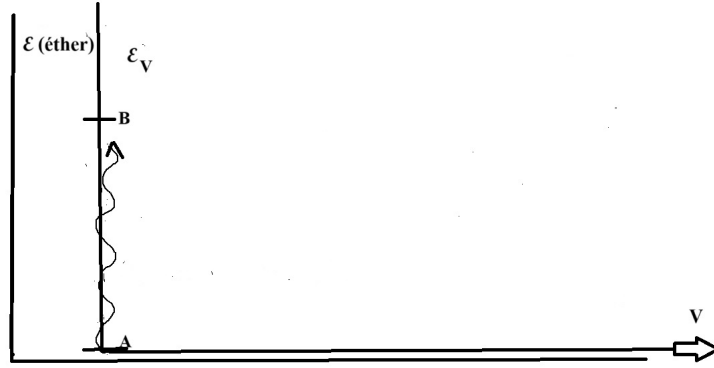


Figure 12: Cas d'un trajet perpendiculaire à  $\mathbf{V}$

Le trajet de B vers A prend le même temps  $t$ . Dans ce cas d'un trajet lumineux perpendiculaire à  $\mathbf{V}$ , le temps d'aller-retour du signal lumineux entre A et B est donc

$$T' = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - V^2}} = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

ce qui est plus petit que  $T$  donné par l'équation (1), avec  $T - T' \simeq T \times \frac{V^2}{2c^2}$ . Par conséquent, si l'on tourne l'interféromètre, on devrait observer un déplacement des franges d'interférence. <sup>5</sup>

Les résultats de calcul (1) et (2) sont, bien entendu, connus depuis longtemps, mais une remarque importante peut néanmoins être faite. *Il n'y a, dans les calculs élémentaires faits ci-dessus, aucune intervention d'un quelconque changement de coordonnées ni d'une quelconque "loi de composition des vitesses" : toutes les coordonnées et toutes les vitesses sont définies uniquement dans le référentiel  $\mathcal{E}$ .* Il n'y a ainsi aucune intervention de la cinématique classique, et la conclusion obtenue est donc très contraignante : si la lumière se propage de façon isotrope à la vitesse  $c$  dans un certain référentiel  $\mathcal{E}$ , et si un interféromètre est lié à un référentiel  $\mathcal{E}_V$  animé d'un mouvement de translation uniforme à la vitesse  $\mathbf{V}$  par rapport à  $\mathcal{E}$ , alors les temps de parcours d'un signal lumineux se propageant entre deux miroirs distants (*pour le référentiel  $\mathcal{E}$* ) de  $d$  sont donnés respectivement, dans les deux cas considérés ci-dessus, par les formules (1) et (2). Des rotations de l'interféromètre devraient donc nécessairement donner lieu à un déplacement de franges observable, pourvu que la précision du dispositif interférométrique soit suffisante — ce qui était le cas dans l'expérience de Michelson et Morley pour les vitesses attendues, de l'ordre de la vitesse orbitale de la Terre (30 km/s) [4].

<sup>5</sup> Pour les orientations  $\theta$  du trajet lumineux qui sont intermédiaires entre les deux qui viennent d'être examinées (disons  $\theta = 0$  et  $\theta = \pi/2$ ), il y a une transition continue entre les valeurs  $T$  et  $T'$ . Ceci est calculé dans le travail [5] : Eq. (6) avec  $\beta = 1$  (pas de contraction).

## 6 La solution de l'énigme

### 6.1 La contraction des longueurs

Le champ électrique d'une charge électrique *au repos* a la symétrie sphérique : le champ est radial et les surfaces équipotentielles sont des sphères centrées sur la charge. Fin 1888, le physicien anglais Heaviside calcule que le champ électrique d'une charge *en mouvement* est "contracté" dans la direction du mouvement [6]. Les équipotentielles sont des ellipsoïdes : des sphères "aplaties". En mai 1889, pour expliquer le résultat nul de l'expérience de Michelson et Morley, le physicien irlandais FitzGerald, qui était en relation avec Heaviside, introduit sa *contraction des longueurs des objets matériels, seulement dans la direction du mouvement par rapport à l'éther* [7], dans le même rapport que la contraction trouvée par Heaviside. Je cite un passage très important :

"I have read with much interest Messrs. Michelson and Morley's wonderfully delicate experiment attempting to decide the important question as to how far the ether is carried along by the earth. Their result seems opposed to other experiments showing that the ether in the air can be carried along only to an inappreciable extent. I would suggest that almost the only hypothesis that can reconcile this opposition is that the length of material bodies changes, according as they are moving through the ether or across it, by an amount depending on the square of the ratio of their velocity to that of light."

En 1892, Lorentz introduit la même contraction, pour la même raison [3]. D'où le nom de *contraction de FitzGerald-Lorentz*.

Il est probablement utile de rappeler que non seulement Lorentz (prix Nobel en 1902 avec Pieter Zeeman pour "leurs recherches sur l'influence du magnétisme sur les phénomènes radiatifs") mais aussi Heaviside et FitzGerald étaient tous les trois des spécialistes renommés de l'électromagnétisme et en particulier de la théorie de Maxwell.

### 6.2 La contraction des longueurs résout l'énigme

Grâce à la contraction de FitzGerald-Lorentz, les temps d'aller-retour de signaux dans l'interféromètre ne dépendent plus de l'orientation, donc on n'attend plus de déplacement de franges — si (et seulement si [5]) la contraction est, comme le supposaient FitzGerald [7] et Lorentz [3], dans le rapport

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} > 1. \quad (3)$$



Figure 13: Oliver Heaviside (1850-1925)

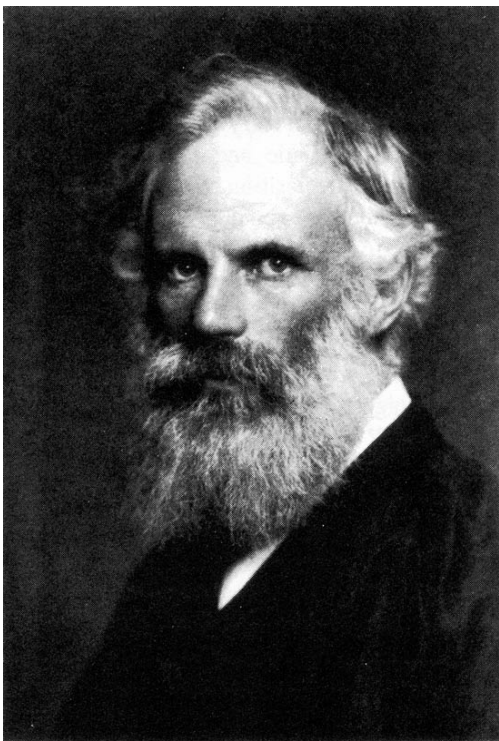


Figure 14: George Francis FitzGerald (1851-1901), Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)



Figure 15: Henri Poincaré (1854-1912)

Ainsi, la longueur d'un bras d'interféromètre qui a la longueur  $d$  lorsqu'il est immobile dans  $\mathcal{E}$  devient

$$d' = \frac{d}{\gamma} < d \quad (4)$$

si l'interféromètre va à la vitesse  $\mathbf{V}$  et que le bras considéré est *parallèle* à  $\mathbf{V}$ . La valeur (3) est justement le coefficient de contraction qui affecte le champ électrique selon le calcul de Heaviside [6]. Il est facile de voir que c'est bien cette valeur et uniquement cette valeur qui rend les temps de parcours (1) et (2) égaux : on doit en effet reporter dans (1) la valeur  $d'$  au lieu de  $d$  (puisque le trajet considéré est par hypothèse parallèle à la vitesse  $\mathbf{V}$ ), mais dans (2) la valeur  $d$  reste inchangée (puisque le trajet considéré est par hypothèse perpendiculaire à la vitesse  $\mathbf{V}$ ).

## 7 Les contributions de Poincaré

### 7.1 Un travail de Poincaré en 1900

Dans un article de 1900 [8], à l'occasion d'un jubilé en l'honneur de Lorentz, Henri Poincaré analyse et complète la théorie de Lorentz. Entre autres contributions :

— Il y montre que l'équilibre d'un milieu matériel en présence d'un champ électromagnétique (EM) nécessite d'attribuer au champ EM une *masse reliée à son énergie dans*

le rapport  $K_0 = 1/c^2$ . Ce qui initie l'équivalence masse-énergie introduite par Einstein en 1905.

— Il y introduit la synchronisation des “montres” par échange de signaux lumineux : les montres en A et B sont synchronisées si, lorsque A et B émettent tous deux un signal lumineux l'un vers l'autre à  $t = 0$ , chacun le reçoit au même temps  $t$ . C'est ce que l'on appelle aujourd'hui la “synchronisation d'Einstein” (1905). Dans un référentiel en mouvement à vitesse  $V$ , un signal entre deux points liés à ce référentiel met en fait plus de temps dans le sens du mouvement (vers  $x > 0$ ) que vers  $x < 0$ , on l'a vu. Donc ce procédé de synchronisation fait que les montres mobiles retardent par rapport aux montres immobiles, proportionnellement à  $x$  : Poincaré [8] dit qu'il définit un *temps local*

$$t' = t - Vx/c^2, \quad (5)$$

où  $t$  est le “temps vrai” mesuré par des montres fixes (par rapport à l'éther). Il est en effet assez facile de vérifier ce point. <sup>6</sup> Lorentz avait introduit le même temps local (5) comme un artifice de calcul pour l'étude des équations de Maxwell dans un référentiel en mouvement, sans aborder la question de la synchronisation des montres. C'est donc bien Poincaré qui a découvert le sens physique du temps local (5). Poincaré [8] affirme aussi qu'en utilisant ce temps local, [Lorentz a montré que] le “*principe du mouvement relatif*” (ce que Poincaré appellera en 1904 le “principe de la relativité”, voir ci-dessous) est vrai “en négligeant  $V^2$ ” ( $/c^2$ ), “à moins de faire une certaine hypothèse complémentaire que je ne discuterai pas pour le moment” (sûrement la contraction).

## 7.2 L'exposé à la Conférence de Saint-Louis (1904)

Dans cet exposé [9], Poincaré introduit notamment

*“Le principe de la relativité, d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement de translation uniforme; de sorte que nous n'avons et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes, oui ou non, emportés dans un pareil mouvement.”*

Il dit que ce principe “*s'impose à nous de manière irrésistible*”, mais qu'il est “*battu en brèche*” par les théories actuelles (donc en 1904) de la physique. Que les expériences, par contre, sont conformes à ce principe (on l'a vu). Et que, “*si Lorentz s'en est tiré*” [s'il a restauré la validité de ce principe dans l'électrodynamique], “*ce n'est qu'en accumulant les hypothèses.*”

<sup>6</sup> I.e.: si l'on suppose que le temps dans  $\mathcal{E}_V$  est  $t' = t + ax$ , on montre assez facilement que l'hypothèse de synchronisation signifie (exactement) que  $a = -V/c^2$ .



### 7.3 Les deux articles de 1905

Dans un article paru le 5 juin 1905 [10], Poincaré corrige le travail de Lorentz [11] :

Il écrit *pour la première fois* ce que *lui*, et nous depuis, appelons “**transformation de Lorentz**” entre deux référentiels inertiels :

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - Vt), & y' &= y, & z' &= z, & (6) \\t' &= \gamma(t - Vx/c^2). & & & & & (7)\end{aligned}$$

Il corrige aussi les transformations de la charge et du courant électrique. Un mois après (mais l'article correspondant [12] est paru en 1906), il complète l'électrodynamique relativiste et obtient même toute la formulation quadri-dimensionnelle de la relativité. Ceci est bien montré par Logunov [13], grâce à l'emploi de notations modernes au lieu de celles de Poincaré.

L'équation (7) contient la *relativité du temps et de la durée*. En particulier, comme la contenait déjà l'éq. (5) du “temps local”, l'équation (7) contient la *relativité de la simultanéité* : Deux événements simultanés dans le premier référentiel ( $t_1 = t_2$ ) ne le sont plus dans le deuxième ( $t'_1 \neq t'_2$ ).

Mais, à ma connaissance, *Poincaré ne commentera jamais ces deux points dans une publication*, bien qu'ils soient des conséquences immédiates de la transformation de Lorentz et donc, à mon humble avis, ne pouvaient absolument pas échapper à un chercheur aussi perspicace que l'était Poincaré.

## 8 L'approche d'Einstein

Dans le célèbre article *reçu* le 30 juin 1905 [14], Einstein présente son approche :

— Le principe de relativité et *l'invariance de la vitesse de la lumière* sont posés comme hypothèses.

— Il définit et utilise, sans le citer, la même synchronisation que Poincaré [8, 9], décrite plus haut.

— *La transformation de Lorentz (6)-(7), non nommée et présentée comme nouvelle, est déduite de ces hypothèses.*

— L'article d'Einstein [14] détaille la contraction des longueurs, la relativité de la simultanéité et la dilatation du temps, qui sont des conséquences “simples” (quoique surprenantes) de la transformation de Lorentz.



Figure 16: Albert Einstein (1879-1955)

— Il prouve l’invariance des équations de Maxwell par transformation de Lorentz (déjà affirmée par Poincaré dans son article de début juin 1905 [10] et démontrée par lui dans l’article de juillet 1905 paru en 1906 [12]).

— Il montre qu’en cas de mouvement relatif du récepteur et de la source, le décalage Doppler de la fréquence d’une onde EM doit être corrigé. Il existe même si la vitesse de la source est *perpendiculaire* à sa direction (“effet Doppler transversal”).

## 9 La renaissance de la version de Lorentz-Poincaré

### 9.1 L’analyse moderne de la théorie de Lorentz-Poincaré

Depuis Whittaker [15], de nombreux auteurs ont examiné en détail le “chemin historique” vers la théorie de la relativité, basé sur le concept d’éther, et l’ont complété. Voir notamment les références [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

Comme on l’a vu : pour interpréter l’absence d’effet (pas de décalage des franges d’interférence) dans l’expérience de Michelson-Morley, on doit postuler que, dans un référentiel en mouvement à vitesse  $\mathbf{V}$  par rapport à l’éther, les objets matériels sont contractés, seulement dans la direction parallèle à  $\mathbf{V}$ , dans le rapport (3) :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} > 1. \quad (8)$$

## 9.2 La dilatation du temps

On calcule aussi [19, 5] qu'avec la contraction de FitzGerald-Lorentz, le temps d'aller-retour d'un signal lumineux dans le référentiel en mouvement  $\mathcal{E}_{\mathbf{V}}$  est

$$T_{\mathbf{V}} = \gamma T_{\mathbf{V}=0} > T_{\mathbf{V}=0} \quad \left( T_{\mathbf{V}=0} = \frac{2d}{c} \right), \quad (9)$$

indépendamment de l'orientation du rayon lumineux. (Ce temps  $T_{\mathbf{V}}$  se lit directement sur la formule (2) puisqu'elle correspond au cas où la contraction n'intervient pas, et se vérifie aussi sur la formule (1) après remplacement dans celle-ci de  $d$  par  $d' = d/\gamma$ .) Cette indépendance, comme on l'a déjà vu, explique le résultat négatif de Michelson & Morley.

L'aller-retour d'un signal lumineux entre deux miroirs fournit donc une horloge correcte (puisque la durée de cet aller-retour ne dépend pas de l'orientation de cette horloge), même lorsque ce système est en mouvement. Or l'équation (9) montre que la période de cette horloge augmente lorsqu'elle est en mouvement (ce qui autorise à parler de "dilatation du temps"), dans le même rapport  $\gamma > 1$  que la contraction de FitzGerald-Lorentz.<sup>7</sup> Ceci est cohérent avec un résultat de Larmor [23] sur les temps de révolution des électrons autour de l'atome. Il est raisonnable d'en déduire que, pour toute horloge, sa période augmente selon l'équation (9) lorsqu'elle est en mouvement. Autrement dit (puisque le temps mesuré par l'horloge est le nombre de ses périodes), le temps s'écoule plus lentement pour les objets qui sont en mouvement par rapport à l'éther  $\mathcal{E}$ . Ce ralentissement du temps dû à la vitesse a été vérifié dans de nombreuses expériences.

## 9.3 La transformation de Lorentz

On peut se douter que, partant de ces effets, on peut en déduire la transformation de Lorentz. (C'est le chemin inverse de l'article d'Einstein [14].) Celle-ci n'avait pas été prouvée, mais posée par Poincaré [10, 12] (et aussi, mais pas sous la forme exacte, par Lorentz [11]). Cette déduction a été faite par Prokhovnik [19]. Il obtient d'abord l'invariance de  $c$ , puis la loi de transformation des vitesses, et ensuite la transformation de Lorentz. Le reste de la théorie suit, et avait déjà été obtenu par Poincaré [10, 12].

---

<sup>7</sup> En fait, ces calculs peuvent être faits avec  $\mathcal{E}$  et  $\mathcal{E}_{\mathbf{V}}$  deux référentiels inertiels *quelconques*, le deuxième étant en mouvement à la vitesse  $\mathbf{V}$  par rapport au premier — à condition d'utiliser le temps synchronisé de Poincaré-Einstein du premier référentiel. En effet, si l'on utilise ce temps, la vitesse de la lumière est, en partie par construction, le même nombre  $c$  dans toute direction de tout référentiel inertiel (ici le premier). Les paradoxes apparents qui peuvent en résulter sont dus au fait que la notion d'événements simultanés dépend du référentiel. Dans l'interprétation de Lorentz-Poincaré, le temps vrai est celui de l'éther, la vitesse de la lumière n'est pas réellement isotrope dans un référentiel en mouvement par rapport à l'éther, et la notion de simultanéité définie dans un tel référentiel est un artefact.

## 9.4 La relativité de la simultanéité

Dans la version standard (Einstein-Minkowski) de la théorie de la relativité restreinte, tous les référentiels inertiels se valent. Or chacun de ces référentiels inertiels a son temps synchronisé : tous ces temps et les définitions de la simultanéité qui leur sont attachées se valent. Alors la relativité de la simultanéité, conséquence de la transformation de Lorentz (cf. §7.3), s'impose. Cela signifie l'absence d'un "présent" indépendant de l'observateur. *C'est impensable !*

En outre, pour un signal supraluminique, il y a inversion possible de la succession temporelle d'un référentiel à un autre. De tels signaux ne pourraient donc exister, sous peine de non-sens, et ainsi leur observation invaliderait la version standard.

Mais dans la version Lorentz-Poincaré de la relativité, il y a le "temps vrai" : celui dans le référentiel de l'éther — donc aussi la "vraie" simultanéité. En bonus : des signaux supraluminiques sont donc envisageables dans cette version [24].

## 10 Remarques finales

Le problème de la Relativité de Lorentz-Poincaré est le suivant : puisque la relativité s'applique exactement, chaque référentiel inertiel peut être choisi comme "l'éther" (le référentiel privilégié)... Ceci n'est pas une contradiction logique de cette théorie, mais elle rend (par construction) l'éther indétectable, ce qui donne à l'hypothèse de l'éther un statut presque métaphysique — à la différence près concernant la possibilité de signaux supraluminiques, mentionnée au §9.4, et aussi tant que l'on ne considère que les phénomènes relevant effectivement de la relativité restreinte. Du point de vue de la Relativité "standard" d'Einstein-Minkowski, l'hypothèse de l'éther apparaît "superflue", selon le mot d'Einstein [14] — dans la mesure où il a en effet obtenu la théorie de la relativité restreinte sans cette hypothèse, avec comme point de départ ses deux hypothèses : Principe de Relativité et invariance de  $c$ . Cependant, la Relativité de Lorentz-Poincaré est plus claire que la Relativité d'Einstein-Minkowski sur la résolution des "paradoxes" apparents, comme le paradoxe des jumeaux dans ses diverses variantes [19, 21].

De plus, il pourrait se faire que l'une des deux hypothèses d'Einstein ne soit pas universellement valide. En particulier, la théorie de la relativité restreinte ne contient pas la *gravitation*. La théorie de la gravitation pourrait être une théorie à référentiel privilégié, avec un éther détectable — à la condition (entre autres) de coïncider avec la relativité restreinte quand le champ de gravitation s'annule. C'est la direction opposée à la "relativité générale" d'Einstein, actuellement acceptée. Une telle théorie a été proposée par l'auteur de cet exposé [5, 24, 25].

## Références bibliographiques

- [1] N. Nio, "Les théories électromagnétiques de l'éther : leur diffusion française, en particulier dans l'enseignement supérieur technique et les revues dédiées à l'électricité à la fin du XIXe siècle", Thèse de Doctorat, Université Paris sciences et lettres (2020).
- [2] H. A. Lorentz, "De l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux", Arch. Néerl. Sci. Exactes et Naturelles, **21**, 103-176 (1886).
- [3] H. A. Lorentz, "La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants", Arch. Néerl. Sci. Exactes et Naturelles, **25**, 366-552 (1892).
- [4] A. A. Michelson et E. Morley, "On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether", Am. J. Sci., **34** (203), 333-345 (1887).
- [5] M. Arminjon, "A theory of gravity as a pressure force. II. Lorentz contraction and 'relativistic' effects", Rev. Roum. Sci. Techn. - Méc. Appl., **38**, N° 2, 107-128 (1993). arXiv:gr-qc/0612036.
- [6] O. Heaviside, "Electromagnetic waves, the propagation of potential, and the electromagnetic effects of a moving charge. Part III", The Electrician, Dec. 7, 1888, p. 147.
- [7] G. F. FitzGerald, "The ether and the Earth's atmosphere", Science, **13**, No. 328, p. 390.
- [8] H. Poincaré, "La théorie de Lorentz et le principe de réaction", Arch. Néerl. Sci. Exactes et Naturelles (2), **5**, 252-278 (1900).
- [9] H. Poincaré, "L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique" (texte d'une conférence donnée au Congrès Universel d'Art et de Science, Saint-Louis (Missouri), 19-26 septembre 1904), Bull. Sci. Math., **28**, 302-324 (1904).
- [10] H. Poincaré, "La dynamique de l'électron", C.-R. Acad. Sci. Paris (Séance du 5 juin 1905), **140**, 1504-1508 (1905).
- [11] H. A. Lorentz, "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light", Koning. Nederl. Akad. Wet., Proceedings, **6**, 809-831 (1904).
- [12] H. Poincaré, "La dynamique de l'électron", Rendiconti Circ. Matemat. Palermo (Séance du 23 juillet 1905), **21**, 129-176 (1906).

- [13] A. A. Logunov, "On the articles by Henri Poincaré 'On the dynamics of the electron'" (Traduction anglaise de la deuxième édition russe d'une brochure parue en 1988), Publishing Department of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna (1995).
- [14] A. Einstein, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Ann. der Phys.* (4), **17**, 891-921 (1905).
- [15] E. T. Whittaker, "A history of the theories of aether and electricity: the modern theories", Vol. 2, Thomas Nelson and Sons (1953).
- [16] G. Builder, "Ether and relativity", *Austr. J. Phys.*, **11**, 279-297 (1958).
- [17] G. Builder, "The constancy of the velocity of light", *Austr. J. Phys.*, **11**, 457-480 (1958).
- [18] L. Jánossy, "The Lorentz principle", *Acta Phys. Polon.*, **27**, 61-87 (1965).
- [19] S. J. Prokhovnik, "The logic of special relativity", Cambridge University Press (1967).
- [20] S. J. Prokhovnik, "The physical interpretation of special relativity—a vindication of Hendrik Lorentz", *Z. Naturforsch.*, **48a**, 925-931 (1993).
- [21] J. Brandes, "Die relativistischen Paradoxien und Thesen zu Raum und Zeit" (3ème édition, Verlag relativistischer Interpretationen, Karlsbad) (2001) (1ère édition: 1994).
- [22] J. Reignier, "De l'éther de Fresnel à la relativité restreinte", *Ann. Fond. Louis de Broglie*, **29**, N<sup>os</sup>1-2, 21-56 (2004).
- [23] J. Larmor, "A dynamical theory of the electric and luminiferous medium. Part III. Relations with material media". *Phil. Trans. Roy. Soc. A: Math., Phys. and Eng. Sci.*, **190**, 206-300 (1897).
- [24] M. Arminjon, "Gravity as Archimedes' thrust and a bifurcation in that theory", contribution invitée au Festschrift de Franco Selleri (G. Tarozzi & A. van der Merwe, éd.), *Found. Phys.*, **34**, 1703-1724 (2004).
- [25] M. Arminjon, "Space isotropy and weak equivalence principle in a scalar theory of gravity", *Braz. J. Phys.*, **36**, 177-189 (2006).