

Revue des questions scientifiques (Namur, Be), 170 (n°2), 1999, 103-150.
Republié dans *Les Relativités*, numéro spécial de la *Revue des questions scientifiques*, 2000, 103-150.

Les trois stades du principe de relativité*

Michel PATY**

RESUME

Avec les “trois stades du principe de relativité”, nous effectuons un retour historique sur plusieurs moments déterminants de l’“invention de la physique”, formant une chaîne temporelle de relations. Nous évoquons, en premier lieu, certains problèmes méthodologiques posés par l’historicité des contenus de connaissance, ainsi que quelques questions soulevées par le choix d’un point de vue et d’un fil directeur, nécessaire pour reconnaître des significations. Nous considérons ensuite les contenus physiques et les contextes qui leur sont relatifs à chacun des “moments” examinés, constituant ce qui apparaît, vu de la fin, comme “l’histoire” d’un “principe de relativité”. Celle-ci comprend tout d’abord la relativité des mouvements de la physique galiléenne et de la mécanique classique, puis le problème posé de son extension ou non à l’optique. La formulation explicite d’un “principe de relativité” s’accompagne d’une confrontation entre la mécanique et l’électromagnétisme, envisagée de diverses façons suivant les auteurs, en particulier par la réforme du cadre conceptuel effectuée par la théorie de la relativité restreinte. Le principe de relativité généralisé pour les mouvements quelconques, résolvant le problème de la gravitation avec la théorie de la relativité générale, détermine la compréhension finale de la notion de “principe de relativité”, pourvue désormais d’une fonction théorique, couronnée par les notions d’invariances et de symétries de la physique actuelle.

ABSTRACT. *THE THREE STAGES OF THE PRINCIPLE OF RELATIVITY.*

With the three stages of the principle of relativity, we undertake a historical return on several determinant moments of the invention of physics, set into a temporal chain of relations. We first discuss some methodological aspects posed by the historicity of knowledge contents, and several questions raised by the choice of a point of view and of a leading thread, necessary to make out meanings. We then consider, for each examined “phase”, physical contents together with their relative contexts, that constitute what will be taken, seen from the end, as the “history” of a “principle of relativity”. Such a history deals first with the relativity of motion of galilean physics and classical mechanics, then with its extension or not to optics. The explicit formulation of a “principle of relativity” is accompanied thereafter by a confrontation between mechanics and electromagnetism, considered differently by several authors and cleared up by the reform of the conceptual framework achieved at by the special theory of relativity. Finally, the generalization of the principle of relativity to all types of motions, with the theory of general relativity providing the solution of the gravitation problem, determines the final understanding of the notion of “relativity principle”, endowed henceforth with a theoretical function, and crowned by the notions of invariance and symmetry of present physics.

* Conférence, Journée *Les Relativités*, Groupe de contact "Histoire comparée des Sciences", Fonds National de la Recherche Scientifique, Université Libre de Bruxelles, samedi 14 novembre 1998.

** Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot, 37 rue Jacob, 75006, PARIS. Courrier-él : paty@paris7.jussieu.fr

MOTS-CLES : Principe de relativité, Théorie de la relativité, Physique, Histoire des sciences, Epistémologie, Historicité des contenus scientifiques

KEYWORDS : Relativity principle, Relativity theory, Physics, History of science, Epistemology, Historicity of scientific contents

1.

INTRODUCTION PROBLEMES DE L'HISTORICITE DES CONTENUS DE CONNAISSANCE

Par les “trois stades” du principe de relativité, j'entends les étapes principales de notre connaissance de la relativité des mouvements, d'abord au sens de la *relativité galiléenne* “classique”, puis à celui de la *relativité einsteinienne “spéciale” ou “restreinte”* (aux mouvements d'inertie), enfin à celui de la *relativité (einsteinienne encore) “générale”* (étendue aux mouvements accélérés quelconques). A chacun de ces stades, la relativité de la classe de mouvements considérés correspond, selon une formulation explicite ou non (elle ne le fut pas, tout d'abord, pour le premier stade), un “principe” fondamental de la physique, utilisé de manière heuristique dans la résolution des problèmes de dynamique où interviennent de tels mouvements. Entendons aussi que le statut du principe par rapport à la (ou aux) théorie(s) physique(s) correspondante(s) ne fut pas nécessairement le même à chacun des trois stades, et que les problèmes de dynamique en relation au principe ne furent pas toujours, à un stade donné, compris de la même manière (notamment au second stade, de la relativité restreinte).

Ces problèmes de dynamique furent, pour le *premier stade*, de la *relativité au sens galiléen*, ceux de la *mécanique*, d'abord des corps solides, terrestres et astronomiques, puis des fluides, de Galilée et Huygens à Newton, de d'Alembert et Lagrange à Poincaré, pour ne mentionner que quelques uns des auteurs marquants. Pour le *second stade*, de la *relativité des mouvements d'inertie* au sens de la relativité restreinte, ces problèmes de dynamique concernaient avant tout l'électromagnétisme, avec l'*électrodynamique relativiste* de Lorentz et de Poincaré, mais aussi avec la *physico-géométrie de l'espace-temps* relativiste de Minkowski. Ils concernaient aussi la mécanique *dans la mesure où* ce qui valait pour l'électrodynamique était conçu par eux comme valant aussi pour la mécanique. Pour Lorentz, Minkowski, Langevin, l'électrodynamique constituait le fondement de toute dynamique, y compris de la mécanique, tandis que Poincaré distinguait la mécanique habituelle, avec son principe galiléen et ses lois de transformations classiques encore valables, et la “nouvelle mécanique”, celle de l'électrodynamique et des mouvements très rapides, pour lesquelles le principe de relativité s'accompagne des lois de transformations de Lorentz. La *théorie* de la *relativité restreinte* au sens d'Einstein mettait, quant à elle, toutes les dynamiques sur le même plan, étant en fait conçue comme une nouvelle *cinématique* de portée

universelle, non attachée à une dynamique donnée, mais portant ses effets sur l'expression de toute dynamique, la mécanique aussi bien que l'électromagnétisme. Elle avait été constituée expressément pour cela.

Pour le *troisième stade*, celui de la *relativité générale*, le principe de relativité est étendu aux mouvements accélérés quelconques, entraînant la condition de *covariance générale*, qui détermine la dynamique du champ de gravitation par la structure locale de l'espace-temps. Le cadre spatio-temporel était dès lors totalement physique et donné par son contenu dynamique.

J'ai essayé, par ces formulations ramassées, où les expressions et les mots ont été pesés autant que possible au plus près de leurs significations, de donner, pour commencer, une sorte de vue synthétique des conceptions auxquelles ces *stades* se rapportent, et même de faire entrevoir les leçons essentielles apportées à notre connaissance de la physique par chacun d'eux. Il me faut maintenant expliciter ces leçons et ces significations dans une mise en perspective de chacun des stades replacé dans son contexte, ainsi que des relations qu'ils entretiennent les uns avec les autres et des *changements*, voire, considérés rétrospectivement du point de vue conceptuel et théorique, des *progressions* et des *mutations* de l'un à l'autre. Peut-être pourrons-nous ainsi capter quelques aspects, saisis au long du temps, de l'*invention* de la science de la physique.

Ce projet porte avec lui les difficultés méthodologiques d'une "dialectique historique", liée à l'historicité des contenus de savoirs. En voulant, en effet, éclairer un (*état*) *passé de la connaissance* considéré en tant que tel, c'est-à-dire saisi dans son historicité et non pas réinterprété dans une rationalité qui lui serait étrangère (la nôtre), *nous ne pouvons cependant éviter* d'en détacher des éléments signifiants sur le fond du contexte d'ensemble par un regard (conceptuel) informé des développements ultérieurs. Or, ces derniers l'affectent à nos yeux d'une signification différente de celle qu'il pouvait avoir dans sa contemporanéité. Non seulement nous ne pouvons l'éviter, mais *nous devons procéder ainsi*, dans une perspective épistémologique sur l'histoire des sciences, car c'est seulement cette perspective qui nous permet de considérer des contenus de connaissance. Pour maintenir l'exigence d'historicité, nous devons seulement *nous mettre à distance* des significations actuelles tout en profitant de l'éclairage en profondeur qu'elles permettent.

Je n'aborderai pas, ici, ce problème méthodologique majeur, constitutif de l'histoire des sciences et de l'épistémologie historique, pour lequel il faut à chaque fois trouver la solution la plus appropriée. Car, si l'on connaît quelques uns des écueils à éviter (tels que celui de projeter notre connaissance actuelle sur le passé), il n'existe pas de méthode générale pour y parvenir. L'exercice de l'histoire demande, tout comme celui de la géométrie, par-delà des règles pour servir de garde-fous, l'"esprit de finesse", car *lire c'est toujours interpréter*. C'est peut-être à cet égard que l'histoire des sciences a le plus à recevoir de l'histoire en général, en apprenant avec les meilleurs historiens à lire et reconstituer tel épisode ou état de choses du passé, et à lui concevoir sa signification propre (celle qu'il eut dans son temps). Le passé qui nous intéresse, ici, est un *passé de connaissance*, avec des *contenus* et des *significations* distinctifs et, dans ce passé, les moments d'apparition de contenus et de formes nouveaux, ou de leurs transformations.

Plutôt qu'un exposé détaillé de chacun des stades du principe de relativité, je voudrais inviter à porter un regard, comme d'en haut du sentier gravi,

sur le chemin parcouru considéré dans son ensemble (avec la mémoire historique pour en approprier le souvenir). Je le ferai sous la forme de remarques épistémologiques portant sur les significations de contenus en rapport à leur historicité, avec le propos de tenter de retrouver les difficultés ou les obscurités dans les élaborations de ces contenus de connaissance, mais aussi leurs significations, pleines ou partielles, telles qu'on peut les supposer avoir été comprises et vécues dans leur contemporanéité, par leurs auteurs respectifs. Mais, en même temps que l'on tente ainsi de les comprendre reconstituées par l'histoire, elles prennent pour nous le sens d'être inscrites dans un chemin temporel. Ce chemin est celui d'une série de constructions conceptuelles, théoriques, dont résultent des états de connaissances imprévisibles auparavant, qui appartiennent à la physique et déterminent ce qu'elle est à chaque époque examinée. Peut-être font-elles aussi naître en nous de nouvelles significations pour aujourd'hui, et un autre regard sur ce qu'est la physique de notre propre temps.

2

POINTS DE VUE ET FILS DIRECTEURS POUR UN RETOUR HISTORIQUE

On constate, en examinant le rapport entre les trois stades de l'histoire du principe de relativité, à partir de notre point de vue informé d'aujourd'hui, la mise au jour progressive d'un certain nombre d'éléments conceptuels et théoriques qui n'étaient pas nécessairement clairs lorsqu'ils furent introduits ou repensés, aux époques considérées.

Et d'abord, les termes et les concepts qui nous sont les plus familiers aujourd'hui en rapport à la *relativité des mouvements*, à savoir “*théorie de la relativité*”, et même “*principe de relativité*”. Ces expressions sont récentes, surtout la première, qui n'apparaît que plusieurs années après la conception, la publication et la diffusion de la théorie qu'elle désigne, à savoir la *théorie de la relativité restreinte*. Cette locution a été utilisée une première fois par Einstein en 1907, mais il ne l'a adoptée systématiquement qu'en 1911¹. Nous y reviendrons à propos des deuxième et troisième stades, puisque c'est seulement avec la théorie de la relativité restreinte, puis générale, qu'il est question, en physique, d'une *théorie* de la relativité.

Quant à l'expression “*principe de relativité*”, elle n'est apparue que tardivement, avec Poincaré, en 1904, suivi de près par Einstein, en 1905. Au vu de son adoption dès lors très rapide et universelle (quoique longtemps accompagnée de débats, et de critiques de la dénomination de la théorie d'Einstein, qui donna lieu à des malentendus²), on s'étonne parfois de ce qu'elle n'ait pas été utilisée auparavant, à propos de la mécanique, alors que le contenu même du principe était largement connu, adopté et mis en œuvre à partir du XVII^e siècle, comme nous le

¹ Einstein [1907b, 1911].

² Ces débats furent inséparables de la réception de la *théorie* d'Einstein, essentiellement entre 1919 et 1924 (Glick [1987], Paty [1987]).

verrons à propos du premier “stade”, et que le terme “principe” était par ailleurs d'usage courant en physique. Mais c'est sans doute que l'expression n'avait pas alors ce caractère “naturel” qu'elle prit dès qu'elle fut inventée, pour des raisons sur lesquelles on peut s'interroger. Reconnaissons toutefois que la formule quelquefois employée, au XIX^e siècle surtout, de “*principe du mouvement relatif*” ne fait pas une grande différence avec “*principe de relativité*”. Le terme “relativité”, sans autre spécification, était certainement trop vague pour être considéré jusqu'alors comme un concept physique.

Il faut donc plutôt penser que le terme “relativité” aura acquis un sens nouveau et précis, scientifique, à la faveur d'une cristallisation conceptuelle et d'une convergence de plusieurs “relativités”, en mathématiques comme en physique. La relativité de l'espace, du temps, du mouvement, propriétés considérées depuis longtemps, acquièrent un surcroît de sens théorique avec la théorie des groupes, qui fait de ces relativités des propriétés d'invariance. Il y a sans doute plus qu'une coïncidence dans le fait que la dénomination de “principe de relativité” ait été adoptée presque simultanément par Poincaré et par Einstein, qui démontrèrent que les mouvements d'inertie (voir la nouvelle loi relativiste de composition des vitesses), et les transformations associées, ont des propriétés de groupe.

Nous aurons encore à nous demander si le terme est toujours nécessaire pour que la chose existe, c'est-à-dire si, sans l'appellation de “principe”, la formulation ou la constatation d'une “relativité du mouvement” par des auteurs du premier ou du second “stade” de notre histoire n'équivaut pas, par la fonction qu'il lui font jouer, à sa considération de fait comme un principe. Une réponse positive justifierait le titre adopté pour le présent exposé : “Les trois stades du principe de relativité”. Ce sera, en tout état de cause, l'un des fils directeurs des réflexions qui suivent : dans quelle mesure la relativité du mouvement est-elle de fait un principe, quelle est sa fonction dans l'abord effectif des problèmes physiques étudiés, et pour la conception de la physique à laquelle elle a partie liée ? Ces questions se posent aussi bien pour la constitution de la mécanique classique qu'à propos des conceptions de la physique mathématique et théorique dans son ensemble.

Le lien, déjà évoqué, de la relativité des mouvements avec la *relativité de l'espace et du temps* nous fournit un autre fil directeur, celui de la conception (mais aussi de l'élaboration, de la construction) des concepts-grandeurs espace et temps correspondants. Le *type d'élaboration théorique* constituée avec le principe de relativité (ou son équivalent sans la formulation) et les grandeurs espace et temps est encore un autre aspect à considérer, lié à la question de la mathématisation de la théorie. En général, le principe de relativité n'est pas utilisé seul dans ces élaborations³.

On pourrait dresser, à partir de ces aspects ou fils directeurs, un tableau pour chacune des époques, dans lequel seraient reportés les caractères, éléments acquis de connaissance ou problèmes, qui nous paraissent les plus marquants eu égard à la chaîne temporelle qui relie les trois étapes entre elles. On indiquerait aussi, en regard, l'apparition puis les transformations de concepts ou de relations, indépendants, au début, de la relativité des mouvements, mais dont les développements ultérieurs devaient manifester le lien de nécessité qu'ils entretiennent avec elle. Voir, par exemple, l'égalité des accélérations dans un champ

³ Nous y reviendrons en conclusion.

de pesanteur à une hauteur donnée, constatée par la loi galiléenne de la chute des corps, puis sa transcription conceptuelle dans la mécanique newtonienne en égalité des masses inertielle et gravitationnelle, transformée ensuite par Einstein en principe d'équivalence entre un champ de gravitation homogène et un mouvement uniformément accéléré, lié dès lors au principe de relativité généralisé pour former la théorie de la relativité générale. Seule la connaissance des dernières étapes du développement de la question permet de comprendre le lien entre ces propositions initialement séparées.

Penser la question du principe de relativité à partir du point d'arrivée oblige, dans le retour vers le passé, à saisir des fils qui étaient, à l'époque, sans connexion mais qui, curieusement, s'accompagnaient. Ce n'était pas coïncidence fortuite ; ils manifestaient l'existence d'une corrélation souterraine et fondamentale entre eux. Si l'unification, qui donne sens à cette "co-présence", ne fut qu'ultérieure, du moins peut-on et doit-on constater cette dernière comme un fait à l'époque donnée ; on ne peut aussi qu'y voir un indice d'une nécessité sous-jacente qui s'imposerait à une rationalité future, comme l'un des matériaux constitutifs de ses constructions. Ce qui montre, ici encore, que l'histoire des sciences, à moins de n'être qu'un compte-rendu superficiel des savoirs d'une époque, une simple chronique "journalistique", ne peut être simplement factuelle, puisque les faits qu'elle retrace sont des faits signifiants. Cette signification dépend du regard actuel que l'on porte sur elle, lequel oriente, par une demande d'intelligibilité minimale, le *choix des faits* et, en l'occurrence, au-delà du domaine où on aurait pu les penser initialement circonscrits. Notons que cet élargissement du domaine factuel tient à celui même du concept visé et du champ de ses problèmes.

3

LA RELATIVITE DES MOUVEMENTS ET LA CONSTITUTION DE LA DYNAMIQUE

Dans une lettre de 1920 à son ami Maurice Solvine où il lui résumait en peu de mots l'essentiel de sa théorie, Einstein rappelait "le fait connu depuis l'antiquité que le mouvement n'est perceptible que comme mouvement relatif"⁴. Cette évidence de l'expérience courante est assurément immémoriale, et remonte bien plus haut que l'antiquité ; c'est peu s'avancer que de la supposer commune à toutes les civilisations, à toutes les cultures, et préexistant à toute science. Il suffisait, par exemple, d'avoir pris place dans un canot, et d'y avoir vu bouger les rives... C'est pourquoi, peut-être, elle est si difficile à retrouver dans les exposés de science, même après qu'elle ait été reconnue et utilisée par plusieurs des fondateurs de la physique. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, très peu de traités sur la mécanique l'énoncent explicitement. Ernst Mach lui-même, dans son ouvrage sur l'histoire de cette science, ne l'évoque qu'à propos de Huygens. La relativité des mouvements, non nommée, ou très peu nommée, n'est pas absente pour autant de

⁴ Einstein, lettre à Maurice Solovine, 24 avril 1920, in Einstein [1956], p. 18-19. Cf. Paty [1993], chap. 3, p. 93.

la pensée de la mécanique classique : elle lui est inhérente, et elle ne se détacherait, pour ainsi dire, dans toute sa portée, que lorsqu'elle se serait affrontée à des difficultés, et les aurait dépassées.

Reprenons quelques uns des moments où la relativité des mouvements est invoquée dans des textes théoriques. Deux siècles avant Galilée, au XIV^e, Jean Buridan et Nicole Oresme mentionnaient la possibilité d'une rotation diurne de la Terre sur elle-même, en considérant le mouvement relatif d'un navire par rapport à un autre. "Si l'on se meut sur un navire en s'imaginant qu'il est immobile", écrivait Buridan, "et si l'on aperçoit un navire effectivement immobile, il semble que cet autre navire se meuve ; car l'œil verra exactement de la même façon dans le cas où le premier navire se mouvra, l'autre étant immobile, et dans le cas contraire"⁵. Il reprenait un argument déjà très antérieur, correspondant à un fait universellement constaté, comme on l'a dit. Il le rapportait, quant à lui, à la perception.

Buridan concevait qu'il serait plus simple de considérer que la Terre seule se meuve plutôt que l'ensemble des sphères célestes. Il réfutait cependant le mouvement de la Terre en reprenant l'argument d'Aristote d'une flèche lancée à la verticale, que l'on voit retomber à l'endroit d'où elle est partie et non en arrière comme on devrait s'y attendre, puisque la portion de la Terre d'où elle est partie s'est éloignée pendant son vol. A ceux qui objectaient que la flèche serait entraînée par l'air qui serait mu en même temps que la Terre, Buridan rétorquait que "l'élan de la flèche lancée vers le haut résisterait au mouvement latéral de l'air, et la flèche ne serait pas déplacée autant que l'air". Il s'appuyait sur l'observation de ce qui a lieu par grand vent, à savoir que la flèche n'est que très peu déplacée par le mouvement de l'air⁶.

Ce "qui manquait" à Buridan, comme à Nicole Oresme et, d'une manière générale, à tous les penseurs précédant Galilée⁷, pour dépasser cette argumentation, c'était la notion de mouvement d'inertie. La relativité des mouvements ne pouvait acquérir une *fonction théorique* tant que le mouvement restait indissociable de sa cause ou moteur. Le concept de mouvement étant lié à celui d'espace, il était encore tributaire de la notion aristotélicienne, qualitative, de "lieux" naturels. Les maîtres d'Oxford et de Paris avaient bien tenté de libérer le mouvement du moteur initial par l'"*impetus*", force présente dans le corps en mouvement (transmise par le moteur initial et conservée), mais c'était encore un *concept dynamique* (et qualitatif) qui ne permettait pas de concevoir tous les mouvements sur un même pied "ontologique". Cette notion permit toutefois d'introduire une approche quantitative, avec la définition de vitesses moyennes pour des intervalles de temps donnés et celle d'une accélération uniforme⁸, et de "géométriser" (mathématiser) progressivement le mouvement.

C'est à Galilée, comme on sait, qu'il revint de formuler le premier l'équivalence des mouvements d'inertie, avec son "*impeto*" conçu comme *mouvement acquis* (effet, et non plus cause) porté par les objets mus, qui lui permettait de concevoir le *mouvement d'inertie*, c'est-à-dire continué uniformément

⁵ Buridan [v. 1340a et b]. Voir des extraits dans Clagett [1959], p. 532-539, 557-564, 594-599.

⁶ Oresme développait un argument semblable : Oresme [1377] ; cf. Clagett [1959], p. 681, et extraits du texte d'Oresme, p. 600-609.

⁷ Sur les conceptions de Buridan, Oresme, Vinci, cf. Duhem [1906-1913, 1913-1959] ; Clagett [1959], p. 541 et suiv.

⁸ Sur le "théorème de Merton" de l'accélération uniforme, voir Clagett [1959], p. 255 et suiv.

et en ligne droite sur sa lancée (encore que restreint, pour lui, au seul mouvement horizontal, dégagé de la pesanteur)⁹. Il n'y avait plus de différence de nature entre l'état de mouvement et celui de repos (le mouvement était désormais un *état*, non une qualité substantielle), et la loi dynamique concernait, dès lors, les seuls *changements de mouvement*, caractérisés par le concept d'*accélération* (ce qui, notons-le, implique de manière naturelle la relativité des vitesses pour ce qui est de la loi).

Cela permettait de ramener, pour ainsi dire, le mouvement au repos (relativité des mouvements). Galilée pouvait alors trouver géométriquement la trajectoire d'un corps mobile, en décomposant sa vitesse, acquise en un point de sa trajectoire, en celle due à l'inertie et celle due à la force qui le sollicite, par exemple dans la chute libre des corps graves. Galilée était en mesure de composer géométriquement (par le "parallélogramme des vitesses") les vitesses de mouvements désormais conçus selon une homogénéité conceptuelle, alors qu'ils étaient antérieurement séparés en "naturels" (ceux dûs à la gravité) et "violents" (ceux dûs aux chocs)¹⁰, mais aussi les vitesses acquises et leurs accroissements (dûs à la pesanteur).

Il parvint ainsi à la *loi de la chute des corps*, qui énonçait 1°) l'égalité des accélérations de tous les corps tombant d'une hauteur donnée, indépendamment de leur forme ou de leur nature¹¹, 2°) La variation des distances de chute avec les carrés des temps correspondants, que les corps tombent à la verticale ou à l'oblique (trajectoire parabolique)¹². Soulignons incidemment que *le temps* entrait ainsi pour la première fois comme la variable d'une *loi dynamique en physique*, et que celle-ci était d'expression totalement *mathématique* ; elle résultait tout autant de la réflexion théorique que de l'expérimentation, comme en attestent les carnets d'expérience de Galilée¹³.

Cette loi était donc la même dans un bateau en mouvement (rectiligne uniforme) et sur le quai du port. C'était la *première expression théorique* (en termes de propriété d'une loi dynamique) *de la relativité du mouvement rectiligne uniforme*.

Galilée se trouvait par là-même en mesure de réfuter l'objection de Buridan, et l'on pouvait concevoir, avec Copernic, que la Terre se meuve, et non le Soleil et la voûte céleste¹⁴. Dans ses *Dialogues concernant les deux plus grands systèmes du monde : le ptoléméen et le copernicien* (deuxième journée), Galilée fait exposer par son porte-parole Salviati à Simplicio, qui professe les idées d'Aristote, l'expérience de pensée d'une pierre lâchée d'une tour, située sur la Terre, et donc emmenée par le mouvement de cette dernière : "[Le] mouvement [de

⁹ Cf. Koyré [1939], Drake [1957].

¹⁰ Nicolas Tartaglia avait développé cette distinction au XVI^e siècle. Léonard de Vinci et Nicolas de Cues, en proposant l'idée de "mouvement mixte", ouvrirent la possibilité de concevoir la composition de mouvements différents.

¹¹ Elle devait constituer ultérieurement la base du "principe d'équivalence" de la relativité générale d'Einstein. Son effet, exprimé comme l'égalité des temps de descente de deux corps quelconques, était une idéalisation négligeant la résistance de l'air. Elle est, à strictement parler, valable seulement dans le vide.

¹² Galilée [1638]. Cf. Paty [1997].

¹³ Sur la place de la réflexion théorique et de l'héritage d'Archimède, voir Koyré [1939], et sur l'expérimentation, Drake [1980].

¹⁴ Cf. Szsceciniaz [1998]. Galilée [1632].

la pierre] serait donc un composé des deux mouvements, celui avec lequel elle longe la tour [celui de haut en bas] et celui qui fait qu'elle la suit ; le résultat, c'est que la pierre devrait décrire non plus une simple ligne droite et verticale, mais une ligne transversale qui peut-être n'est pas droite" (c'était le mouvement mixte).

La *relativité des mouvements* avait acquis, par la loi de la chute des corps et celle de la composition des vitesses pour deux référentiels en mouvement relatif, une formulation et un statut *théoriques*, à savoir que la loi physique (celle de la chute libre) est indépendante de l'état de mouvement (inertial) du corps dont elle est le siège. En fait, elle était impliquée dans la loi dynamique, sous les espèces de la transformation (dite désormais "galiléenne") de coordonnées entre deux systèmes en mouvement inertial relatif¹⁵ et de la loi ("galiléenne") d'addition des vitesses.

Après Galilée, le principe d'inertie fut formulé plus complètement, pour toutes les directions, indépendamment de la pesanteur conçue désormais comme extérieure aux corps, par René Descartes et par Pierre Gassendi. Descartes, Galilée, Huygens, et Leibniz aussi¹⁶, concevaient les concepts d'espace, de temps et de mouvement de la mécanique comme relatifs, puisqu'ils concernent les positions ou les mouvements de corps par rapport à d'autres corps. Dans ses *Principes de la philosophie*, Descartes exprimait sa conception du mouvement totalement relatif en prenant l'exemple des rouages de la montre d'un marinier sur un bateau en mouvement¹⁷.

Huygens devait reprendre cette idée pour exprimer les lois du choc des corps élastiques auxquelles Descartes, pour sa part, n'avait pu parvenir, en raison notamment de l'insuffisance de sa conception de la conservation de la quantité de mouvement (qu'il appliquait arithmétiquement, pour une grandeur scalaire). Du moins, Descartes avait-il énoncé le principe de cette conservation, qui n'était encore qu'implicite dans l'*impeto* galiléen, et qui fut l'un des premiers jalons de la mathématisation des grandeurs mécaniques. La formulation quantitative de ce principe fut précisée ensuite par Christiaan Huygens, qui découvrit la conservation de la force vive et donna l'expression de la force centrifuge dans le mouvement circulaire¹⁸. Ajoutons à cela que Huygens donna le premier les moyens théoriques et pratiques de la détermination du *temps*, voué à être une variable fondamentale de la dynamique, par la résolution du problème du centre d'oscillation et du tautochronisme de la courbe cycloïde, ainsi que la mise au point d'une horloge à balancier de haute précision¹⁹.

On ne peut comprendre le repos et le mouvement dans les corps si ce n'est par rapport à d'autres corps, écrivait Huygens en 1654 : car rien ne peut être imaginé du mouvement dans les corps que ce qui échange les distances et les

¹⁵ Par cette loi de transformation ($x' = x - vt$, dans la direction du mouvement), le temps entrait dans la définition de la variable d'espace. Les transformations de ce type constituent ce qu'on appellerait bien plus tard le "groupe de Galilée". Quant à la loi d'addition des vitesses correspondante, c'est : $u' = u - v$.

¹⁶ Sur les critiques par Leibniz de l'espace et du temps absolus de Newton, et sa conception de l'espace et du temps comme un ordre, respectivement, "des coexistences" et "des successions", et sur leur relativité ("Je tiens l'espace pour quelque chose de purement relatif, comme le temps"), voir la *Correspondance entre Leibniz et Clarke*, in Leibniz [1715-1716]. Voir aussi ses réponses à John Locke dans les *Nouveaux essais sur l'entendement humain* (Leibniz [1703]).

¹⁷ Descartes [1644], *Principes de la philosophie*, AT, 2^e partie, p. 76-81.

¹⁸ Voir le mémoire "De vis centrifuga", dans Huygens [1888-1950], vol. 16.

¹⁹ Huygens [1888-1950], vol. 18, en particulier le mémoire *Horologium Oscillatorium* (1658).

positions mutuelles des corps²⁰. C'est à lui que l'on doit d'avoir donné, à la même époque, l'expression la plus forte de la relativité des mouvements, reprise de Galilée et de Descartes, en lui octroyant une *fonction heuristique* pour la formulation de lois générales de la dynamique telles que les lois des chocs des corps élastiques²¹. Il donnait ainsi à ce qui nous est connu comme “principe de relativité” sa *première expression complète pour la mécanique*, et sa *fonction de principe*, sans le terme, mais avec tout le contenu.

Huygens étudiait des boules parfaitement élastiques se heurtant sur un billard lui-même placé sur un bateau en mouvement. Les lois du choc entre des corps, qui sont par ailleurs en mouvement par rapport à d'autres corps, sont les mêmes que si l'on fait omission de ces autres corps et de leurs mouvements, communs aux corps dont on considère le choc. Grâce à cette considération, Huygens put démontrer ses lois du choc (deux masses élastiques égales échangent leurs vitesses et, quand elles sont inégales, elles le font en raison inverse de leurs masses), en ajustant la vitesse fictive de la barque suivant les configurations des vitesses dans les chocs étudiés²².

En termes de repères ou référentiels liés à l'étude du mouvement, cette manière de procéder revient à considérer que tous les repères sont équivalents, qu'aucun n'est privilégié. Elle fut, après Huygens, d'application très courante. Les phénomènes qui ne dépendent que de *vitesses relatives*, c'est-à-dire de *différences de vitesses*, ne sont pas affectés par l'adjonction d'une vitesse fictive (arbitraire, et que l'on peut donc choisir) attribuée à tout l'environnement du système considéré.

4

RELATIVITE DES MOUVEMENTS ET MECANIQUE CLASSIQUE

Vint ensuite Newton, qui dressa les plans de l'édifice de la mécanique classique, en établit le cadre conceptuel, et formula la théorie du mouvement des corps, c'est-à-dire la mécanique (fondée sur les trois “lois du mouvement”), et la théorie de la gravitation universelle. Il le fit sur la base du concept de point matériel, auquel pouvaient s'appliquer les lois générales du mouvement reprises des prédécesseurs et mises en axiomes, développées dans leurs conséquences par l'usage de la géométrie et de l'analyse (principalement sous la forme d'une *géométrie des limites* équivalente à son calcul des fluxions²³). Pour distinguer les

²⁰ Huygens [1888-1950], vol. 16, p. 111. Voir le mémoire “Du mouvement des corps sous l'effet d'une percussion” (datant de 1656, cf. Huygens [1703]), suivi de suppléments, composés entre 1652 et 1675, en particulier les “Pièces et fragments concernant la question de l'existence et de la perceptibilité du mouvement absolu”, in Huygens [1888-1950], vol. 16, p. 213-233 ; “La relativité du mouvement et la non existence d'un espace absolu”, *Ibid.*, vol. 21, p. 506-508.

²¹ Cf., en part, Mach [1883], Frankfort & Frenk [1976], Vilain [1993].

²² Communication à la Société Royale de Londres, 4 janvier 1669. Voir Huygens [1703], *De Motu corporum ex percussione*, éd. posth., 1703, in Huygens [1888-1950], vol. 16, p. 80-91. Voir Mach [1883], trad. fr., p. 301-313, Vilain [1993], p. 19.

²³ Newton [1787], Livre 1, section 1, 3ème éd., tr. angl., éd. Cajori, p. 29-40. Voir aussi, p. ex., Livre 2, section 2, p. 249.

corps et l'espace (et par là-même la mécanique et la géométrie), que Descartes avait voulu identifier ontologiquement en voyant dans l'*étendue* la "propriété essentielle" des corps, Newton affecta ces derniers d'une autre propriété, outre l'extension, à savoir l'"*impénétrabilité*", conçue vraisemblablement en référence à l'atomisme, bien que Newton l'attribuât non à la raison mais à la sensation. ("L'étendue, la dureté et l'impénétrabilité, la mobilité et l'inertie du tout résultent de [celles] des parties ; d'où nous concluons que les plus petites particules des corps sont également étendues, dures et impénétrables, et mobiles, et dotées de leur propre inertie". Un paragraphe plus loin, Newton les affecte aussi d'un "principe de gravitation mutuelle"²⁴).

Sa distinction, absente chez Galilée et imprécise chez Descartes, entre le *poids* et la *masse*, permettait d'aller plus loin dans l'expression quantitative des grandeurs mécaniques et de leurs relations. Indiquons, par ailleurs, que Newton constata l'égalité de la "*masse d'inertie*", apparaissant dans sa "seconde loi du mouvement" (elle vient de la définition de la "*force accélératrice*"²⁵), et de la masse comme coefficient de sa loi de gravitation²⁶, ou "*masse gravitationnelle*". Cette égalité n'était autre que l'expression, conceptualisée en termes du concept de masse, de l'égalité d'accélération de chute libre à une hauteur donnée pour tous les corps (loi de Galilée). Vérifiée avec une précision de plus en plus grande jusqu'aux expériences d'Eötvös, conclues vers 1914, elle était considérée comme fortuite jusqu'à la relativité générale d'Einstein, où elle fut prise comme une identité, et choisie comme l'un des deux piliers principaux de la théorie.

Newton formula la loi fondamentale de la dynamique, exprimant le changement de quantité de mouvement en fonction de la force appliquée, explicitée ultérieurement comme la loi de "causalité instantanée" de la mécanique²⁷. L'intervention, dans cette loi, de la seule force accélératrice exprime la dépendance des phénomènes mécaniques par rapport aux seules différences de vitesses, et donc aux vitesses relatives. La "seconde loi de Newton" exprime donc implicitement la relativité du mouvement pour la dynamique dans toute sa généralité, par-delà la seule loi de la chute des corps de Galilée, la loi des chocs élastiques de Huygens et d'autres lois de chocs exprimées aussi à l'aide du caractère relatif des vitesses.

Cet implicite fut, en fait, formulé de manière très explicite par Newton, qui énonça la relativité des mouvements (d'inertie) et des vitesses uniformes, eu égard, précisément, à sa seconde loi, qui stipule que "le changement de mouvement est proportionnel à la force motrice imprimée ; et il a lieu en ligne droite dans la direction de la force imprimée"²⁸. Le cinquième corollaire aux lois du mouvement, référence faite à la seconde, spécifie que "Les mouvements des corps enfermés dans un espace quelconque sont les mêmes entre eux [lisons : les uns par rapport aux autres], que cet espace soit au repos, ou qu'il se meuve uniformément en ligne

²⁴ Newton [1787], Livre 3, Règles du raisonnement, commentaire à la règle 3, 3ème éd., tr. angl., éd. Cajori, p. 399.

²⁵ Suivant la notation différentielle, qui lui est postérieure, $F_a = m_I \frac{dv}{dt}$.

²⁶ $F_G = G \frac{m_G M_T}{d^2}$.

²⁷ C'est à Newton que revient l'invention du temps instantané, comme instant du passage à la limite dans ses constructions géométriques. Voir Paty [1994a].

²⁸ Newton [1687], 3ème éd., tr. angl., éd. Cajori, p. 13.

droite sans aucun mouvement circulaire”²⁹.

Cependant, à la différence de ses prédécesseurs Galilée, Descartes, Huygens, Newton professait un espace, un temps et un mouvement “absolus, vrais et mathématiques”, par opposition aux mêmes concepts relatifs, pour les choses sensibles. La relativité du mouvement était donc pour lui effective selon la perception sensible, tout en coexistant avec la pensée d'un mouvement absolu, qui légitimait à ses yeux la mathématisation de la mécanique³⁰. Les accélérations, qu'il pensait par rapport à l'espace absolu³¹, pouvaient seules révéler un mouvement absolu, et la relativité du mouvement était de toute façon cantonnée aux mouvements d'inertie, dénués d'accélération les uns par rapport aux autres : la coexistence était donc possible dans cette limite. Indiquons encore deux notions de la mécanique newtonienne qui se heurteraient aux développements ultérieurs du “principe de relativité” : *l'action instantanée à distance*, le caractère absolu de la *simultanéité* (lié au temps absolu).

Dans les extensions ultérieures de la mécanique newtonienne à toutes les espèces de corps solides, puis aux fluides, aux milieux continus et aux champs, et dans celle de l'action gravitationnelle de deux corps à trois (et à n), l'ensemble des règles, définitions et principes de la mécanique restaient valable, en particulier la “relativité des mouvements”, qui avait été nécessaire à la constitution de la mécanique classique, et sa justification par l'expression des lois de la dynamique sous la forme d'équations différentielles du second ordre.

Dans son *Traité de dynamique*, de 1743, d'Alembert donna une présentation systématique de la mécanique vue comme une *théorie du mouvement des corps*, en prenant comme concepts fondamentaux ceux qui caractérisent le mouvement. De la sorte, son second principe devenait celui de la “composition des mouvements”, le troisième étant celui “de l'équilibre” (correspondants aux deuxième et troisième lois newtoniennes du “changement du mouvement par la force” et de “l'action et la réaction”)³². Le principe de composition des mouvements avait pour corollaire la “loi de la dynamique” newtonienne, puisque, les grandeurs physiques étant conçues mathématiquement selon les concepts du calcul différentiel, la composition des vitesses comprenait les accroissements instantanés différentiels de ces dernières. En vérité, c'est la conceptualisation des grandeurs physiques par l'analyse, acquise après Newton, qui permettait à d'Alembert de penser la mécanique “à partir du mouvement seul”. Une telle perspective était propre à faire ressortir l'importance de la relativité des mouvements (d'inertie).

Son deuxième principe permettait immédiatement à d'Alembert d'ajouter algébriquement un mouvement quelconque à un mouvement donné d'un ensemble de corps (la notation synthétique pour les trois composantes, du type $a = a + b - b$, était vectorielle avant la lettre), et contenait en fait la relativité du mouvement. Celle-ci est plus apparente encore dans les conséquences du théorème général de la

²⁹ Newton [1687], 3ème éd., tr. angl., éd. Cajori, p. 20. Voir trad. Mme du Châtelet, 1756, p. 26.

³⁰ Cf. Paty [1994a].

³¹ Voir son expérience du seau tournant, exposée dans le “Scholium” des “Définitions” (Newton [1687], éd. Cajori, vol. 1, p. 7-12). Cf. Ghins [1990]. Voir les commentaires qu'en donna Ernst Mach dans sa *Mécanique* (Mach [1883], trad. fr., p. 220-234), et qui eurent une influence sur Einstein dans la genèse de la théorie de la relativité générale. Cf. Paty [1993], chap. 5.

³² Son premier principe était celui de l'inertie, qu'il appelait “principe de la force d'inertie”, comme la première loi de Newton. Cf. Paty [1977].

dynamique ou principe de d'Alembert, qui résulte d'une combinaison des trois principes, et qui contient, en fait, la relativité du mouvement comme cas particulier (les liaisons d'un système rigide de corps sont les mêmes que les corps soient en repos ou animés d'un mouvement commun). Ceci était rendu explicite dans l'étude du mouvement du centre de gravité d'un système de corps (on peut, pour étudier le mouvement des parties d'un système donné, ajouter ou retrancher une même vitesse commune à chaque partie du système, ce qui donne le théorème du centre de gravité, ou son équivalent³³). D'Alembert rendait également manifeste, dans le *Traité de dynamique*, l'expression de la relativité des mouvements dans la forme des équations différentielles³⁴.

D'Alembert utilisa aussi la relativité du mouvement de manière heuristique dans son traitement de la mécanique des fluides, en particulier dans les problèmes de résistance des fluides aux corps solides qui y sont plongés. Il suivait en cela une considération faite par Newton au Livre 2 des *Principia*, où il était traité des fluides en vue de réfuter les explications de la gravité en termes de tourbillons cartésiens. Newton écrivait : “Car l'action du milieu sur le corps étant la même (par le corollaire 5 des lois) soit qu'il se meuve dans un milieu au repos, soit que les particules de ce milieu viennent choquer ce corps supposé en repos avec la même vitesse...”³⁵. D'Alembert fit usage de cette propriété dès ses premiers travaux soumis à l'Académie des sciences, en 1739-1742, sur la “réfraction des corps solides dans les fluides”³⁶. Ce problème, l'un des premiers de mécanique qu'il ait abordés, était suffisamment complexe pour qu'il ne puisse le résoudre que huit ans après, par l'analyse, grâce à l'utilisation des équations aux dérivées partielles. Mais cette première approche lui donna l'occasion de concevoir son *théorème général de la dynamique* (ou “principe de d'Alembert”)³⁷, exposé dans le *Traité de dynamique* de 1743³⁸. Dans son premier mémoire, de 1739, dont on ne connaît que le résumé donné par les rapporteurs, d'Alembert recherche “le mouvement d'un conoïde quelconque qui s'enfonce (...) [dans un] fluide”, d'abord à la verticale puis à l'oblique, en calculant la résistance du fluide à un instant quelconque pour une vitesse donnée du solide. “Il imagine alors comme en pareil cas, qu'au lieu que le corps se meuve, c'est le fluide qui vient le frapper...”, soulignaient les académiciens rapportant avec louange cette “théorie très curieuse de la réfraction”³⁹. Il n'est pas excessif de dire que le caractère relatif du mouvement a conduit d'Alembert à la formulation de son principe, ce qui contribue encore à conférer à “la relativité” un rôle central dans l'édification de la mécanique analytique⁴⁰.

³³ D'Alembert [1743], seconde partie, chap. 2 (“Propriétés du centre de gravité commun de plusieurs corps”), éd. 1743, p. 52 et suiv.

³⁴ D'Alembert [1743].

³⁵ Newton [1687], livre 2, prop. 34, théorème 28, 3ème éd., tr. angl., éd. Cajori, vol. 2, p. 331 ; trad. Mme du Châtelet, cf. *supra*, p. 350

³⁶ Une étude de ces mémoires, restés inédits, est donnée dans Grimberg & Paty [à paraître].

³⁷ J'ai établi récemment, avec Gérard Grimberg, cette origine du principe de d'Alembert : Grimberg & Paty [à paraître].

³⁸ D'Alembert [1743], seconde partie, chap. 1.

³⁹ Rapport, lu le 6 février 1740 devant l'Académie des Sciences de Paris, par Jean-Jacques Dortous de Mairan et Alexis Clairaut, sur le mémoire de d'Alembert intitulé “Du mouvement d'un corps qui s'enfonce dans un fluide”. Cf. Grimberg & Paty [à paraître]. Ces mémoires, et d'autres de mathématiques, valurent à d'Alembert d'entrer à l'Académie comme membre associé en 1741.

⁴⁰ Joseph Louis Lagrange devait tirer pleinement parti du principe de d'Alembert, à l'aide du calcul des variations, pour parvenir aux équations générales de la mécanique (Lagrange [1788]).

D'Alembert reprit cette utilisation dans son *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*, de 1744⁴¹, ainsi que dans son ouvrage fondamental, *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*, de 1749-1752, dans lequel il posa les jalons essentiels de l'analytisation de l'hydrodynamique, formulée à l'aide des équations différentielles partielles⁴². Arrêtons-nous brièvement à son raisonnement.

Pour traiter de la résistance rencontrée par un corps s'enfonçant dans un fluide, il commençait d'entrée par rappeler que l'on peut considérer indifféremment que le corps s'enfonce dans le fluide ou que le fluide frappe le corps. "Car pour cela il suffit de concevoir que le système total du corps et des parties du fluide soit mu dans un sens contraire à celui du corps, avec une vitesse variable égale à celle qu'a le corps à chaque instant ; il est constant que le corps restera en repos dans l'espace absolu, sans que l'action du fluide sur le corps soit changée. D'où il s'ensuit qu'en général *pour déterminer la résistance* d'un fluide à un corps solide qui s'y meut, on peut supposer avec M. Newton, que le corps soit au repos, et que les particules du fluide viennent le frapper avec une vitesse égale [et opposée] à celle que le corps doit avoir"⁴³. On constate bien ici, comme chez Huygens et Newton, le *rôle heuristique* de la relativité des mouvements dans la recherche de lois dynamiques, qui lui octroie de fait la *fonction d'un principe* servant de guide pour la solution des problèmes de dynamique.

Parmi d'autres idées de d'Alembert et de Lagrange qui seraient plus tard concernées par le principe de relativité, on doit mentionner leur allusion au *temps* comme la *quatrième dimension* possible d'une géométrie mécanique, la *mécanique* étant vue comme une *géométrie dans le temps*. Ces dimensions étaient évidemment conçues comme indépendantes et séparables, ce rapport étant sans lien de nécessité (trois dimensions de l'espace d'un coté, la dimension du temps de l'autre), au contraire de ce qui allait advenir avec la relativité restreinte⁴⁴.

Mentionnons encore, pour anticiper sur un prélude aux considérations sur la vitesse de la lumière et sur celle de la gravitation, le nom de Pierre Simon Laplace, et sa conclusion quant à la vitesse de la gravitation, qui devait être infinie, les calculs étant faits dans le cadre de la théorie newtonienne⁴⁵. Poincaré infirmerait ultérieurement ce résultat, mais seulement dans le cadre d'une modification par la dynamique relativiste (au sens restreint) de la loi de gravitation⁴⁶.

⁴¹ D'Alembert [1744].

⁴² D'Alembert [1749-1752].

⁴³ D'Alembert [1744], troisième partie, 1744, p. 203-204. C'est moi (M.P.) qui précise entre crochets.

⁴⁴ D'Alembert [1754], Lagrange [1788]. Cf. Paty [1998].

⁴⁵ Laplace [1896]. Voir Poincaré [1905, 190].

⁴⁶ Poincaré [1905, 1908b].

4

LES MOUVEMENTS RELATIFS
ET L'ETHER LUMINEUX

La relativité des mouvements d'inertie était admise en mécanique classique sans être particulièrement mise en valeur du point de vue des principes. Si elle apparaissait comme fondamentale dans la mécanique de Huygens, qui ne concevait aucun mouvement absolu, son rôle, à partir de Newton, était essentiellement heuristique, comme on l'a vu avec Newton lui-même et avec d'Alembert. Elle était justifiée dans la mesure où les mouvements des corps étaient considérés par rapport à d'autres corps, mais restait simplement approximative dès que l'on considérait les mouvements par rapport à l'espace absolu. Si le "mouvement absolu" échappait aux problèmes ordinaires de la mécanique, il restait posé en astronomie, où l'on se préoccupait d'obtenir la preuve définitive du mouvement de la Terre par la mise en évidence de *parallaxes* pour les étoiles fixes : le système des étoiles fixes était généralement conçu, dans la ligne de pensée newtonienne, comme lié à l'espace absolu.

Les parallaxes stellaires ne devaient être mises en évidence qu'au XIX^e siècle (en 1838, par Friedrich Bessel), le caractère infructueux des recherches antérieures ayant été expliqué quelque temps auparavant par l'immensité des distances astronomiques révélées à la fin du XVIII^e siècle par William Herschell. Mais l'identification du système des étoiles fixes et de l'espace absolu n'était plus alors aussi évidente, et ce fut, en fait, par un autre côté, que se trouva posée la *question du "mouvement absolu"*, et donc de la *relativité des mouvements* : non par la mécanique des corps, mais *par l'optique*, ou plutôt, par les rapports entre la théorie de la lumière et la mécanique des corps en mouvement.

Dans le cours de la recherche de parallaxes, William Bradley avait découvert, en 1728, *l'aberration des étoiles*. Elle s'inscrivait encore dans le cadre de la mécanique, avec l'explication proposée par Bradley, dans l'hypothèse corpusculaire newtonienne de la lumière : l'aberration était un effet direct du caractère fini de la vitesse de la lumière, elle résultait de la composition de la vitesse de la Terre avec celle des corpuscules lumineux provenant de l'étoile observée. Elle mettait, de toute façon, en évidence le mouvement de la Terre autour du Soleil et sur le fond du ciel.

Lorsque Jean-Augustin Fresnel proposa, en 1818, sa théorie ondulatoire de la lumière, reprenant, en la modifiant, la théorie ondulatoire de Huygens revivifiée par Thomas Young, alternative à la théorie corpusculaire de Newton⁴⁷, il fut amené à reprendre le principe de l'explication de Bradley, mais sans l'hypothèse corpusculaire. L'aberration résultait du déplacement relatif de la lunette d'observation, liée au mouvement de la Terre, par rapport à la direction des ondes lumineuses provenant de l'étoile ; par ailleurs, elle exigeait un éther

⁴⁷ Huygens [1690], Newton [1704], Fresnel [1866-1870]. Cf. Mayrargue [1991].

immobile⁴⁸. Cette formulation de l'explication en termes de *déplacements*, plutôt que de *vitesse*s, est intéressante d'un point de vue rétrospectif, en ce qu'elle s'accorde au point de vue de la relativité restreinte... Elle est sans doute liée à la conscience qu'avait Fresnel de ce que la vitesse de la lumière dans le vide reste constante et ne s'additionne pas à celle de la Terre. (Et, dans l'observation de l'aberration, l'angle de visée restait le même que le tube de la lunette soit rempli d'air ou d'eau⁴⁹).

L'*unicité de la vitesse de la lumière dans la théorie ondulatoire*, affirmée par Fresnel, était un autre élément fondamental, résultant de la conception de la lumière comme propagation d'ébranlements d'un même éther, lui-même immobile, quelle que soit la couleur (c'est-à-dire la longueur d'onde) des rayons lumineux. Dans la théorie corpusculaire, au contraire, on se serait attendu à des vitesses différentes selon l'origine des corpuscules lumineux (bien que Bradley lui-même ait conclu, de l'uniformité de l'aberration, à celle de la vitesse de la lumière pour les diverses étoiles). François Arago avait effectué, cependant, des observations avec sa lunette à prisme, dès 1806, montrant que la vitesse de la lumière en provenance de sources très différentes, célestes et terrestres, était la même (par l'identité de leur réfraction par le prisme, celle-ci devant être fonction de la vitesse, en théorie newtonienne)⁵⁰. Il avait confirmé par d'autres expériences, faites en 1810 à plusieurs moments de l'année⁵¹, que la loi de réfraction était insensible au mouvement de translation de Terre⁵². Fresnel y vit une évidence contre la "théorie de l'émission", et en faveur de sa "théorie des ondulations".

Sa théorie était basée sur le concept d'"éther luminifère", milieu continu élastique supposé servir de support des vibrations de la lumière, et propre à un traitement analytique, en analogie avec les fluides, par des équations aux dérivées partielles. De tels milieux permettaient d'étendre les équations de la mécanique analytique, conçue dans sa généralité comme "physique mathématique", à d'autres domaines de la physique que la mécanique : Laplace et Fourier développaient de

⁴⁸ L'aberration est définie comme le rapport de la vitesse de translation de la Terre (v) à la vitesse de propagation de la lumière dans le vide (V), soit : $a = \frac{v}{V} \approx 10^{-4}$. En fait, il existe une différence

entre l'angle d'aberration (φ) selon la théorie corpusculaire ($tg\varphi = \frac{v}{V}$) et selon la théorie ondulatoire ($\sin\varphi = \frac{v}{V}$) : cf. Poincaré [1889], chap. 8.

⁴⁹ Propriété, constatée par les astronomes, liée à l'indifférence de la réfraction au mouvement de la Terre, constatée par Arago.

⁵⁰ Une explication assez peu vraisemblable en avait été proposée par Biot, reprise par Laplace, mentionnée par Arago, en termes d'une sensibilité sélective de la rétine de l'œil, qui ne verrait qu'un domaine restreint de longueurs d'onde. L'hypothèse faisait référence au rayonnement infra-rouge découvert par William Herschell en 1801. Voir Arago, p. ex. dans son éloge de Fresnel (Arago [1830]), Laplace [1796], ré-éditions, livre 2, chap. 2.

⁵¹ Pour deux vitesses opposées de la Terre, à six mois d'intervalle dans sa course autour du Soleil. Arago ne publia ses résultats qu'en 1853, mais ils avaient été rapportés auparavant dans divers traités (Arago [1810]).

⁵² "Lorsque les corps réfringents sont en mouvement, la réfraction qu'éprouve un rayon ne doit plus se calculer avec sa vitesse absolue, mais bien avec cette même vitesse augmentée ou diminuée de celle du corps, c'est-à-dire avec la vitesse relative du rayon" (Arago [1810]). Les inégalités de réfraction ne pouvaient espérer être mises en évidence qu'avec des mouvements rapides comme ceux des planètes. Pour plus de détails, voir Mayrargue [1991], Pietrocola [1992], Paty [à paraître, b].

cette façon la théorie analytique de la chaleur. Fresnel considérait, différemment d'eux, et bientôt de Siméon Denis Poisson concernant l'optique, que les propriétés de ce milieu devaient être conçues selon la spécificité à laquelle obligent les phénomènes. (Il devait concilier l'élasticité d'un milieu vibratoire et la dureté exigée par la polarisation transversale, l'éther perdant ses caractéristiques intuitives pour le sens commun pour celles d'une conceptualisation mathématisée). Il affecta l'éther d'une immobilité absolue, qui permettait d'affirmer *l'unicité de la vitesse de la lumière* et son *indépendance par rapport au mouvement de sa source*.

Fresnel devait donc rendre compte en même temps des deux résultats, de l'aberration, et de l'expérience d'Arago concluant à l'indépendance de la loi de réfraction de la lumière par rapport au mouvement de la Terre. Dans sa "Lettre à François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique", il proposa l'hypothèse d'un "entraînement partiel" de l'éther luminifère par les corps en mouvement qui le traversent, basée sur un modèle théorique dynamique de l'éther immobile⁵³. Cet entraînement avait pour effet de modifier la vitesse de la lumière dans le milieu réfringent, la modification étant exprimée par l'introduction d'un "coefficient de Fresnel", fonction de l'indice moyen de réfraction⁵⁴. Si l'éther traversé par la lunette contenant de l'air était entraîné par le mouvement de cette dernière, il n'y aurait pas d'aberration. Mais avec une lunette emplie d'eau, milieu réfringent, l'éther étant partiellement entraîné avec une vitesse fonction de l'indice de réfraction, il en résultait une compensation telle que, pour l'observateur entraîné avec la Terre, l'angle de visée d'une étoile était le même pour un télescope à air ou à eau. La réfraction de la lumière d'étoiles ou d'autres sources par un prisme donnait la même loi, indépendamment du mouvement d'entraînement.

Autrement dit, *la loi de la réfraction de l'optique* ne permettait pas de mettre en évidence un "mouvement absolu". La théorie de Fresnel comportait trois éléments qui devaient être d'une importance fondamentale en relation à l'avènement du "principe de relativité". Le premier était l'existence d'un référentiel physique au repos absolu, l'éther. Le second, la *constance de la vitesse de la lumière* dans le vide, indépendamment du mouvement de la source, non seulement dans le système de l'éther, mais dans tout référentiel en mouvement relatif par rapport à ce dernier. Le troisième, conçu en fait comme lié au précédent, était l'indépendance de la loi de réfraction par rapport à l'état de mouvement (du moins, au "premier ordre de l'aberration", mais on ne posait pas, alors, la question des ordres supérieurs). Cette "invariance" était, en réalité, l'effet d'une compensation, due au coefficient de Fresnel, qui recevait son explication d'un modèle dynamique hypothétique de l'éther, l' "entraînement partiel".

Cette relativité effective des mouvements n'était pas conçue comme une relativité de principe, et ne pouvait l'être, en raison de la propriété de l'éther d'être à

⁵³ Modèle basé sur une différence de densité entre l'éther et la matière, en termes de l'indice moyen de réfraction du milieu réfringent. Voir Fresnel [1818].

⁵⁴ La formule de Fresnel est : $\frac{V'}{n} = \frac{V}{n} \pm v(1 - \frac{1}{n^2})$, V' et V étant les vitesses de la lumière respectivement dans le milieu réfringent en mouvement et dans le vide, n l'indice moyen de réfraction, le facteur $\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$ étant le coefficient de Fresnel.

l'état de repos, et donc d'une distinction fondamentale entre le repos et le mouvement. Les recherches en optique relatives au mouvement portèrent par la suite, d'une part sur la validité de l'hypothèse de Fresnel et du coefficient d'entraînement partiel, d'autre part sur la possibilité, laissée ouverte en principe, de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre. Il n'est pas question ici d'en donner un panorama. Nous mentionnerons seulement trois résultats qui furent d'une importance considérable.

Le premier est l'expérience réalisée par Hippolyte Fizeau en 1751, qui vérifia le bien-fondé de la formule de Fresnel en la "matérialisant", pour ainsi dire, par un rayon lumineux divisé pour traverser un double tube à air et à courant d'eau, et donnant des interférences en se recombinaient. L'absence de déplacement de franges en inversant le sens du courant rendait bien compte de la formule d'entraînement partiel⁵⁵. Cette expérience éliminait par ailleurs complètement l'éventualité d'un entraînement total de l'éther⁵⁶.

Le deuxième est la réalisation de toutes les expériences possibles sur les lois de l'optique (diffraction, réfraction, double réfraction, polarisation rotatoire) pour des systèmes en mouvement avec la Terre, qui mirent en évidence l'absence de différence avec des systèmes au repos. Ces expériences de grande précision utilisaient soit des sources terrestres, soit de la lumière solaire réfléchie par un miroir. Le mouvement d'ensemble d'un système optique (source, réseau ou instrument optique, récepteur, observateur) ne pouvait être mis en évidence : dans tous les cas, une compensation avait lieu, qui s'expliquait par la prise en compte de l'effet Doppler-Fizeau sur la longueur d'onde, et par le coefficient de Fresnel pour la réfraction⁵⁷.

Eleuthère Mascart, qui effectua toutes ces expériences de manière systématique⁵⁸, concluait ses recherches, en 1874, en énonçant "que le mouvement de translation de la Terre n'a aucune influence appréciable sur les phénomènes d'optique produits avec une source terrestre ou avec la lumière solaire, que ces phénomènes ne nous donnent pas le moyen d'apprécier le mouvement *absolu* d'un corps et que les mouvements relatifs sont les seuls que nous puissions atteindre"⁵⁹. Cette remarque représente l'*extension à l'optique de la relativité des mouvements* de la mécanique (limitée toutefois au premier ordre en $\frac{v}{c}$). Mais il ne s'agissait pas d'un véritable "principe", puisqu'elle n'était comprise que comme le *résultat de compensations*. On pouvait penser qu'il serait possible de mettre en évidence un effet de mouvement absolu pour peu que l'on puisse utiliser des sources vraiment fixes, sans dispositif de réflexion entraîné, comme le serait la lumière des étoiles : telle était l'opinion de Mascart, mais aussi celle d'Henryk A. Lorentz qui citait et

⁵⁵ L'expérience de Fizeau (au premier ordre de l'aberration) fut refaite en 1886 par Michelson et Morley [1886], avant leur expérience au second ordre restée célèbre.

⁵⁶ Lorentz, Poincaré et Einstein adoptèrent plus tard l'éther électromagnétique immobile de Hendryk Lorentz, repris de Fresnel, contre l'éther entraîné par les corps de Heinrich Hertz, repris de celui de Stokes, en se référant à cet argument. Cf. Paty [1993], chap 2 et 3, et [à paraître, a].

⁵⁷ Dans le cas des interférences par diffraction, la compensation est donnée par l'effet Doppler-Fizeau seul, comme Mascart s'en aperçut (Babinet et Angström, qui n'en avaient pas tenu compte, avait cru déceler un effet, en 1839 et 1862 pour le premier, en 1864 pour le second).

⁵⁸ Mascart [1872, 1874]. Cf. Pietrocola [1992].

⁵⁹ Mascart [1874], p. 420.

reprenait les résultats de ce dernier dans ses premiers travaux d'optique⁶⁰.

Il est tentant de remarquer (*a posteriori*) que les phénomènes de compensations qui aboutissaient à produire une relativité des mouvements (au premier ordre de l'aberration) correspondent à une atténuation de l'importance physique du concept d'éther. D'une part, l'*effet Doppler-Fizeau* obligeait à remplacer la "longueur d'onde absolue" (par rapport à l'éther) du rayon lumineux par sa "longueur d'onde apparente"⁶¹, c'est-à-dire, en fait, *relative* à l'état de mouvement du corps traversé par rapport à la source lumineuse. En quelque sorte, l'*éther perdait son statut de repère absolu* pour caractériser les ondes. Il restait toutefois conçu comme le *support de la propagation*.

D'autre part, le *coefficient de Fresnel* atténuait l'*immobilité absolue de l'éther*, d'autant plus que l'hypothèse dynamique donnée par Fresnel pour le justifier s'avérait inadéquate. En effet, les phénomènes de double réfraction étudiés par Mascart vérifiaient le coefficient de Fresnel pour chacun des deux rayons réfractés avec l'indice correspondant, alors que le calcul de Fresnel ne considérait que l'indice moyen. Il fallait donc dissocier *la formule, avec le coefficient, de Fresnel*, qui correspondait aux phénomènes étudiés (et qui, par elle-même, ne disait rien de l'éther), et l'*hypothèse* qui en avait été l'occasion, mais qui apparaissait caduque, ce qui enlevait à l'éther une de ses propriétés supposées.

Le troisième résultat fut celui des expériences au "second ordre" et aux "ordres supérieurs" (en puissances de l'aberration), dont la plus célèbre est restée celle d'Albert Michelson et Edward Morley. Elle fut d'abord interprétée dans le cadre de l'optique pure comme un appui à l'hypothèse d'un éther totalement entraîné de Stokes (alternative à l'éther immobile de Fresnel), puis dans un sens différent, à travers la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell reformulée pour les corps en mouvement par Lorentz⁶². La "théorie mathématique" de la lumière seule, sans hypothèse sur la nature de la lumière, restait en dehors de la question des ordres supérieurs de l'aberration. Elle atteignait également sa limite avec l'absence de justification du coefficient de Fresnel, dont nous venons de parler.

Veltmann et Alfred Potier proposèrent, entre 1872 et 1874, une formulation des lois de l'optique pour les corps en mouvement plus générale que la formule de Fresnel, et valable pour la diffraction comme pour les diverses réfractions⁶³. On pouvait exprimer la formule de Fresnel pour les corps réfringents en termes de vitesses seulement, en incorporant l'indice n du milieu réfringent dans la relation $V = nV'$, entre la vitesse de la lumière dans le vide, V , et celle dans le milieu considéré, V' . On obtenait alors une formule donnant le temps mis par la lumière pour traverser un corps en mouvement : $t = \frac{l}{V} + \frac{lv}{V^2}$ (aux termes du second ordre près en $\frac{vn}{V}$), soit un accroissement, dû au mouvement, de $\frac{lv}{V^2}$.

⁶⁰ Ce serait, pour Mascart, reprendre l'expérience d'Arago avec un prisme chromatique, et non pas achromatique comme celui utilisé par ce dernier en 1810. Voir Mascart [1874], Lorentz [1887, 1892b].

⁶¹ C'était la terminologie employée par Mascart [1874].

⁶² Sur ces changements d'interprétation physique de l'expérience, voir Paty [1994c].

⁶³ Veltmann [1872?], Potier [1874]. Dans les formules qui suivent, j'ai remplacé, quand c'était nécessaire, les symboles des grandeurs pour rester cohérent avec ceux utilisés plus haut.

Potier démontra que cette formule est valable pour tous les phénomènes optiques, en partant de la définition d'un rayon lumineux par le temps minimum du trajet de la lumière d'un point à un autre (définition, soulignait-il, qui est "indépendante de la nature de la surface d'onde et des réflexions et réfractions subies par la lumière"). Or, cette propriété étant considérée pour un système optique (de la source à l'arrivée) au repos, on montre qu'elle est vraie également pour le système en mouvement : le mouvement augmente, en effet, la durée du trajet de la lumière, quelque soit son chemin, de la quantité $\frac{Lv}{V^2}$ (L étant la projection du chemin de la lumière sur la direction de la vitesse). Potier voyait dans les expériences de Mascart des vérifications expérimentales ("très-déliées") de ces propositions. Il précisait que la formule de Fresnel reste valide, "tant que l'on suppose la vitesse des corps pondérables petite par rapport à la vitesse de la lumière", à condition de donner à n la valeur correspondant à la couleur du rayon étudié. Il proposait, en conclusion, de compléter la loi de Fresnel "par cet énoncé purement empirique": "Le temps que met la lumière pour se propager d'un point à un autre d'un corps en mouvement est augmenté d'une quantité indépendante de l'indice de ce corps et égale à $\frac{lv}{V^2}$, l étant la distance des deux points, v la composante de la vitesse du corps suivant la direction des rayons lumineux, et V la vitesse de propagation de la lumière dans le vide".

Tel était le point le plus avancé auquel la théorie "purement mathématique" de la lumière était parvenue, mais elle rencontrait ici ses limites, car ce résultat, imposé par les phénomènes, n'avait qu'une justification empirique (comme celui, relevé par Mascart, du coefficient de Fresnel pour chaque indice de réfringence au lieu de l'indice moyen). C'est ce que souligna Poincaré, en se tournant désormais, dans son cours de "Physique mathématique", vers les théories réellement physiques, électromagnétiques, de la lumière⁶⁴.

5

LE CHAMP ELECTROMAGNETIQUE : VERS UN PRINCIPE DU MOUVEMENT RELATIF

Il nous faut maintenant aborder, à grands traits, quelques aspects essentiels du changement d'approche auquel, tant implicitement que progressivement, la théorie électromagnétique et, en particulier, la théorie électromagnétique de la lumière, a obligé, concernant la relativité du mouvement. La modification la plus fondamentale, mais dont les implications sur le mouvement relatif et ses conditions spatio-temporelles restèrent inaperçues jusqu'à la théorie d'Einstein, fut l'introduction du concept de *champ à propagation de proche en proche*, par Michael Faraday. Si elle coexista, au long du XIX^e siècle, avec l'action instantanée et avec la simultanéité absolue newtoniennes, sa pleine prise en compte devait, comme Einstein le souligna, détruire la première et relativiser la seconde. Le

⁶⁴ Poincaré [1889-1891]. Sur les conceptions de Poincaré concernant l'optique, voir Paty [à paraître, a].

concept de champ était surajouté à la mécanique classique, mais contenait en germe une contradiction avec celle-ci. Cette contradiction demeura longtemps enfouie sous les essais de donner une représentation mécanique du champ en termes d'éther, considéré comme son support.

La théorie de Maxwell se présentait, effectivement, comme une *théorie de l'éther électromagnétique*, union des éthers électrique et magnétique, et identifiée, par construction, à l'éther optique. Elle effectuait à son tour, un changement fondamental dont les implications ne furent, elles aussi, comprises que plus tard, conduisant Einstein à l'élaboration de sa théorie (restreinte). Ce changement concernait le *statut de la vitesse de la lumière*. Cette dernière était le noyau, pour ainsi dire, de l'équation de propagation des ondes électromagnétiques. Einstein devait en faire le principe central de la théorie électromagnétique. Avec Fresnel, nous l'avons vu, la vitesse de la lumière dans le vide était invariante, même en composant son mouvement avec celui de la Terre, mais c'était une coïncidence heureuse pour les observateurs terrestres plutôt qu'un principe de la nature.

Mais, en même temps, dans la théorie de Maxwell, l'unicité et la constance de la vitesse de la lumière n'étaient réalisées que dans le système de l'éther, Maxwell lui-même laissant ouverte la question de savoir si l'éther était immobile par rapport à l'espace absolu ou entraîné dans le mouvement des corps⁶⁵. La deuxième éventualité, adoptée par Hertz (et par Einstein un moment dans sa jeunesse, avant qu'il n'ait connaissance des travaux de Lorentz), aurait eu pour conséquence le respect de la relativité des mouvements par les phénomènes électromagnétiques. Elle se heurtait toutefois au résultat de l'expérience de Fizeau, qui orienta, au contraire, d'abord Lorentz, puis Poincaré et ensuite Einstein, vers la première, l'éther au repos absolu repris de Fresnel.

Les travaux de Lorentz et, à leur suite et en relation à eux, de Poincaré, portèrent sur la modification à faire subir à la théorie de Maxwell pour qu'elle puisse rendre compte de manière satisfaisante des phénomènes électromagnétiques pour les corps en mouvement, et en particulier des résultats "empiriques" obtenus pour l'optique, que nous venons d'évoquer. La théorie de Lorentz, dès sa première forme⁶⁶, faisant des électrons les centres d'émission de champs électromagnétiques conçus comme propagations d'états de vibration de l'éther (un éther sans autre propriété que son immobilité d'espace absolu), obtenait déductivement les lois de l'optique, avec les indices de réfraction, et en particulier, celles de la "compensation" au premier ordre du coefficient de Fresnel. La théorie prévoyait cependant des effets d'"anisotropie terrestre" au second ordre et aux ordres supérieurs, en contradiction avec les résultats négatifs d'expériences comme celle de Michelson-Morley. Lorentz tenta de résoudre la question en ajoutant à sa théorie des hypothèses dynamiques particulières comme celle de la contraction des longueurs dans le sens du mouvement, et de l'introduction d'un temps local conçu comme un artifice mathématique de changement de variable. Pour relier les grandeurs définies dans deux référentiels respectivement en repos et en mouvement, il formula un "principe des points correspondants", qui peut être vu, en fait, comme une première forme du principe de relativité.

Poincaré s'efforça, de son côté, de parvenir à une formulation de la

⁶⁵ Maxwell [1873, 1876, 1890].

⁶⁶ Lorentz [1892a, 1895].

théorie électromagnétique de Maxwell, modifiée dans la direction prise par Lorentz, de façon à la rendre conforme à ce que l'on entend par une véritable “physique mathématique”, sur le mode lagrangien-hamiltonien, c'est-à-dire une “physique des principes” (principes physiques et mathématiques, incluant le principe de moindre action), dégagée de modèles mécaniques et d'hypothèses particulières. Tel fut le sens de ses recherches pour améliorer la théorie de Lorentz. Il faisait porter notamment son attention sur l'importance du principe d'action et de réaction, dont il soulignait le lien au principe de relativité, les deux n'étant plus respectés par les systèmes corps matériels-éther⁶⁷. Lorentz en 1904, et Poincaré en 1905, proposèrent de fonder les modifications théoriques sur des “formules de transformation remarquables” obtenues de manière essentiellement empirique à partir des résultats négatifs des expériences d'optique aux ordres supérieurs. Ils concevaient ces transformations comme nécessitées par la “dynamique électromagnétique”. Ces formules de transformation des coordonnées et du temps (baptisées “de Lorentz” par Poincaré) entraînaient par voie de conséquence l'invariance de la vitesse de la lumière et le principe de relativité par l'invariance des lois de l'électromagnétisme, reformulées pour respecter les équations de transformation⁶⁸.

Le principe de relativité pour l'électrodynamique, dans la théorie électrodynamique de Poincaré, était déduit des prémisses théorico-empiriques, mais cela ne l'empêchait pas de tenir dès lors un rôle de guide pour les formulations théoriques. Il le montra en indiquant le caractère de groupe des transformations de Lorentz, et en calculant les invariants du groupe. Il l'utilisa notamment pour rechercher la forme que devraient avoir les équations de la gravitation, modifiées par rapport à la théorie newtonienne, pour tenir compte d'une propagation à vitesse finie (prise égale à celle de la lumière) et non plus instantanée et de l'invariance relativiste, étendant ainsi, de fait, ces propriétés “relativistes” au-delà de l'électrodynamique⁶⁹.

Avec sa formulation de l'électrodynamique, et notamment la validité pour elle du “principe de relativité”, cette théorie était finalement devenue, comme il le souhaitait, une branche de la “physique mathématique”. Dans sa conception de cette dernière, en effet, la relativité des mouvements était fondamentale, puisqu'elle correspondait à l'expression des lois de la physique à l'aide d'équations différentielles⁷⁰. Evoquant, en 1900, le “*principe du mouvement relatif*” (pour la mécanique analytique), Poincaré le rapprochait de ce qu'il appelait le “*principe de l'inertie généralisé*”, qu'il formulait ainsi : “L'accélération d'un corps ne dépend que de la position de ce corps et des corps voisins et de leurs vitesses”⁷¹. La différence entre les deux était que le second porte sur des vitesses et le premier sur des *différences de vitesses* et entraîne que “les différences de coordonnées”⁷² satisfont à des équations différentielles du second ordre”.

Il plaçait ce principe, qu'il dénomma pour la première fois “principe de

⁶⁷ Poincaré [1895, 1900b]. Cf. Paty [1996a].

⁶⁸ Lorentz [1904], Poincaré [1905]. Voir Paty [1993a], chap. 2, [1996a].

⁶⁹ Poincaré [1905].

⁷⁰ Paty [1999a].

⁷¹ Poincaré [1900a].

⁷² C'est-à-dire les coordonnées relatives.

relativité” en 1904⁷³, parmi les principes généraux de la “physique mathématique”, qui ont permis de dépasser l’approche mécaniste en termes de points matériels et de forces centrales, en exprimant les lois de la physique sous forme d’équations différentielles⁷⁴. Il concevait ces principes comme “des résultats d’expériences fortement généralisées”, cette généralisation s’accompagnant de multiples possibilités de les tester, de telle sorte qu’ils ne laissent plus place au doute, au contraire des hypothèses particulières qu’ils ont permis de remplacer. Cependant, la “crise de la physique mathématique” avait mis ces principes en danger, notamment le principe de relativité⁷⁵.

7

PRINCIPE DE RELATIVITE OU THEORIE DE LA RELATIVITE RESTREINTE ?

Nous n’en avons pas encore terminé avec le “second stade” (il y manque les contributions d’Einstein et de Minkowski), et cependant nous avons presque tout dit de ce que suggérait notre propos. Notre compréhension de la relativité, aujourd’hui, se fonde essentiellement sur les conceptions développées à partir de celles d’Einstein, concernant la relativité restreinte comme la relativité générale. Nous voulions savoir ce que pouvait signifier, pour les périodes antérieures, les *contenus de connaissance* correspondant à *l’idée de relativité des mouvements*. Nous avons vu, en même temps, de quelle manière ces connaissances antérieures ont préparé les connaissances actuelles, et comment elles se sont modifiées et, en particulier, comment elles ont été associées à des formulations théoriques. Avec les résultats auxquels Lorentz et Poincaré sont parvenus, nous nous trouvons déjà de plain-pied avec le sens moderne de la *relativité*, conçue pleinement comme un *principe physique* (il s’agit toujours de la relativité pour les mouvements d’inertie).

Dans son travail de la “relativité restreinte”, Einstein opéra différemment de ses “contemporains considérables”, Lorentz et Poincaré, tout en aboutissant pratiquement aux mêmes formules pour les grandeurs physiques (transformations de Lorentz, équations pour les grandeurs électromagnétiques). La modification de la loi de composition des vitesses par rapport à l’addition galiléenne, qu’il déduisait de sa reformulation de la cinématique, était obtenue en même temps par Poincaré à partir des transformations de Lorentz (mais était absente chez Lorentz). La différence essentielle entre les deux théories (celle de Lorentz et Poincaré d’un côté, celle d’Einstein de l’autre) réside dans leurs types d’approche : la première est une théorie dynamique et correspond à une théorie relativiste de l’électrodynamique, tandis que la seconde est une théorie dont l’objet est plus large que l’électrodynamique, et où la partie cinématique (relative aux grandeurs spatio-temporelles) et la partie dynamique sont séparées, la cinématique conditionnant la dynamique.

⁷³ Poincaré [1904].

⁷⁴ Poincaré [1900], *in* [1905a], p. 126-128.

⁷⁵ Poincaré [1900], *in* [1905a], p. 129, 132-134.

Poincaré n'ignorait pas la modification des grandeurs spatio-temporelles (par les transformations de Lorentz) et concevait le temps local comme un temps donné par des horloges, mais n'en avait pas mis particulièrement en valeur les implications⁷⁶. Einstein traitait d'emblée l'électrodynamique (en partant de la théorie de Lorentz de 1895⁷⁷) comme une théorie “à principes”, dont la thermodynamique fournissait l'archétype, c'est-à-dire une théorie pour laquelle la formulation de ses principes physiques fondamentaux permet d'organiser l'ensemble de la théorie avec les relations entre les grandeurs physiques qu'elle fait intervenir. Il constatait cependant une contradiction entre le principe de relativité et la théorie de Maxwell-Lorentz, par le rôle privilégié que celle-ci faisait jouer à l'éther (ramené à un espace physique absolu). L'électrodynamique devait à ses yeux être réformée tout en respectant deux principes, choisis pour des raisons à la fois théoriques et expérimentales, qui étaient d'une part le *principe de relativité* de la mécanique⁷⁸ et, d'autre part, le *principe de constance de la vitesse de la lumière*, raison d'être de la théorie de Maxwell.

Je ne reprendrai pas ici l'évocation du raisonnement d'Einstein, rappelant seulement qu'il analysa le conflit de ces deux principes et le résolut, après avoir montré la “*relativité de la simultanéité*” requise par des actions à vitesse finie, en modifiant les *conceptions de l'espace et du temps* héritées de la mécanique de Newton. Il les reformula comme des *grandeurs soumises aux deux principes* choisis pour fondamentaux, *ce qui entraînait*, pour le passage d'un référentiel d'inertie à un autre, les *formules de transformation (de Lorentz)*⁷⁹, la *contraction des longueurs* (dans la direction du mouvement) et la *dilatation des durées* définies pour le système en repos relatif. Je passe, ici sur les autres résultats, la *composition relativiste des vitesses* et le caractère de *groupe des transformations*, la formulation covariante des équations de Maxwell, la relation donnant l'inertie de l'énergie...⁸⁰

Passons également sur les développements ultérieurs, avec la formulation mathématique de l'espace-temps de Minkowski et l'explicitation des concepts d'*inertie de l'énergie*, de *causalité relativiste*, ainsi que l'inventaire des *implications physiques* des nouvelles conceptions de *l'espace et du temps*⁸¹. Je terminerai cette période par la question, assurément marquante de la “seconde phase du principe de relativité” dans la perspective que nous avons prise, qui correspond à une modification majeure des conceptions de la physique et comme à une conclusion des élaborations précédentes : le passage du “principe de relativité” à la “théorie de la relativité”.

L'expression “théorie de la relativité” a été utilisée pour la première fois par Einstein en 1907. En réponse à Paul Ehrenfest parlant de “l'électrodynamique

⁷⁶ J'ai essayé ailleurs d'en analyser les raisons, et je n'y reviens pas ici : cf. Paty [1993a], chap 6, et [1996a].

⁷⁷ Lorentz [1895].

⁷⁸ Formulé ainsi indépendamment de Poincaré ; Einstein avait eu, toutefois, connaissance de son expression “principe du mouvement relatif” (Poincaré [1900a]). Il avait probablement eu aussi connaissance de Poincaré [1900b].

⁷⁹ Formules par lesquelles le rapport de l'espace et du temps est symétrisé, la position spatiale entrant dans l'expression du temps transformé (Galilée, comme on l'a vu, avait déjà fait entrer le temps dans la transformation de la position).

⁸⁰ Einstein [1905 a et b]. Cf. Paty [1993a], chap 2 à 4, [1996b].

⁸¹ Minkowski [1907, 1908], Langevin [1911a et b, 1913]. Sur Minkowski, cf. Walter [1996], et sur Langevin, Paty [1987, 1999b et sous presse, b].

de Lorentz, dans la formulation que M. Einstein lui a donnée”, et voyant cette théorie comme un “système clos”, c'est-à-dire comme une théorie dynamique déductive, Einstein décrit sa théorie comme “le principe de relativité ou - plus précisément - le principe de relativité associé au principe de constance de la vitesse de la lumière”, indiquant qu'elle ne constituait pas un système clos, “ni même un système”, et ne portait que *sur la cinématique*. En ses propres termes : [Elle doit être conçue] “simplement comme un principe heuristique qui, considéré en soi et tout seul, ne contient que des énoncés sur des corps rigides, des horloges et des signaux lumineux”⁸².

C'est alors qu'il utilisa l'expression “*théorie de la relativité*” : “*La théorie de la relativité* apporte quelque chose de nouveau uniquement en ceci qu'elle conduit à des relations entre des lois qui, sinon, semblent indépendantes les unes des autres”⁸³. Autrement dit, elle n'est une *théorie* que dans la mesure où elle a une *fonction unificatrice*, qu'elle doit à ses deux *principes*. Einstein faisait d'ailleurs, dans le même texte, allusion à cet égard au second principe de la thermodynamique, pris comme référent, et qu'il devait fréquemment invoquer par la suite.

Auparavant, il parlait de *principe de relativité*, et cette expression était elle-même très récente, nous l'avons dit, forgée pour les nouvelles conceptions dans l'effort même de leur élaboration, respectivement par Poincaré en 1904 et Einstein en 1905, du moins pour ce qui concerne les textes publiés⁸⁴. En 1905, en 1907, et encore après, en 1910, Einstein désignait le plus souvent sa théorie de 1905 comme un travail sur le principe de relativité⁸⁵.

Au moment d'adopter la terminologie qui devait rester, “*théorie de la relativité*”, il hésita, semble-t-il, entre le choix de cette expression et celui de “*théorie de l'invariance*”⁸⁶. Il aurait pu, au vrai, opter pour “*théorie de la covariance*”, caractérisant ainsi ses efforts d'alors vers la théorie de la relativité générale. Mais la “*covariance*” lui serait sans doute apparue comme une condition formelle à obtenir plutôt que comme l'objet même de la théorie. Le rapport du physique et du formel se modifia ensuite à cet égard dans ses conceptions et dans celles des autres physiciens, de telle sorte que la désignation de “*théorie de la covariance*” serait sans doute la plus adéquate, à strictement parler, non seulement pour la théorie généralisée⁸⁷, mais aussi pour la théorie de la relativité restreinte, théorie sinon “sans objet”, du moins sans objet dynamique propre, et dont ce serait ainsi la qualification la plus exacte⁸⁸.

L'expression “*théorie de la relativité*” revêtait, dans la pensée d'Einstein, un sens très spécifique, désignant une théorie *qui se fonde sur* le principe de relativité, ce qui était bien le cas avec sa théorie restreinte comme avec la théorie générale⁸⁹. Mais il en allait différemment avec la théorie de Lorentz et celle

⁸² Einstein [1907b].

⁸³ *Ibid.* Einstein parlait également de théorie de la relativité dans plusieurs de ses lettres à des correspondants à partir de cette époque.

⁸⁴ Poincaré [1904], Einstein [1905].

⁸⁵ Einstein [1905, 1907a et b, 1910].

⁸⁶ Cf. Paty [1993], p. 107, 182-183, 390.

⁸⁷ En spécifiant, bien entendu, “covariance pour les mouvements d'inertie”, “covariance pour les mouvements accélérés quelconques” (cf. Paty [1993], chap. 4, p. 182-183).

⁸⁸ Paty [1993], chapitre 4, p. 176 et suiv.

⁸⁹ *Ibid.*, p. 177, 181.

de Poincaré, formulées pratiquement en parallèle à celle d'Einstein⁹⁰, et avec une autre pensée de la nature et de la fonction du principe de relativité. Ce dernier y était “vérifié” ou “démontré” à la suite d'autres propositions qui constituaient les raisons premières de leurs théories : à savoir, les formules de “transformations de Lorentz” pour les coordonnées d'espace et la variable temps, adoptées sur une base en partie directement empirique, telle que le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley “au second ordre” sur le “vent d'éther”. En outre, les théories de Lorentz et de Poincaré étaient des théories *relativistes de l'électrodynamique*, l'électrodynamique étant constamment au centre de leur formulation, et constituant l'objet même de leurs théories. C'est également ainsi que Paul Ehrenfest et Paul Langevin, mais aussi Hermann Minkowski, concevaient la théorie d'Einstein avant la Relativité générale⁹¹.

Mais la théorie d'Einstein était, en réalité, une théorie *de la relativité* par opposition à une *théorie de l'éther* (électromagnétique), qui privilégiait un état de mouvement (le repos) par rapport aux autres⁹². Elle effectuait, par contraste avec celles de Lorentz et de Poincaré, une séparation, qui était opérationnelle, entre une partie *cinématique* et une partie *dynamique*. Les résultats obtenus pour la cinématique entraînaient des transformations sur la dynamique électromagnétique, mais ne devaient rien à celle-ci en tant que théorie spécifique. Ou, du moins, ce que les considérations sur la cinématique lui empruntaient, c'est-à-dire l'*invariance de la vitesse de la lumière dans le vide* pour tous les systèmes d'inertie, avait-il été retiré des propriétés particulières à l'électromagnétisme pour être érigé en principe physique universel. Ce principe (“deuxième principe” de l'article d'Einstein de 1905) était, certes, dicté par les phénomènes électromagnétiques, et la théorie d'Einstein peut être vue ainsi comme une mise en accord de la physique avec les phénomènes électromagnétiques. Elle est aussi, symétriquement, une mise en accord de la théorie électromagnétique avec le *principe de relativité* (“premier principe” invoqué de l'article), conçu, lui aussi, comme universel. Cette symétrisation du problème par la mise en avant de deux principes physiques généraux libérait la théorie d'un lien exclusif avec l'électromagnétisme : elle portait aussi bien sur la mécanique et sur toute autre théorie qui aurait à respecter ces principes.

En s'en tenant, dans l'exposé de son problème et dans la voie prise pour sa solution, à des principes transcendant les théories dynamiques particulières, Einstein effectuait une modification de l'objet de la théorie qu'il avait initialement visée (l'électrodynamique). Il obtint, en définitive, une reformulation satisfaisante de la théorie électrodynamique non pas directement (en modifiant les grandeurs de cette dernière), mais *par le détour d'une transformation plus générale*, portant sur le mouvement et la définition de son cadre spatio-temporel.

⁹⁰ Voir Paty [1993], chap. 2. Il s'agit de la théorie de la théorie de Lorentz de 1904, point final de ses recherches antérieures (encore ignorée d'Einstein en 1905, qui connaissait seulement les travaux de Lorentz de 1895), et de celle de Poincaré de 1905, conçue par lui comme une amélioration et un complément de la théorie de Lorentz (également ignorée d'Einstein, qui conçut la sienne en même temps). Voir Lorentz [1895, 1904], Poincaré [1905a et b], Einstein [1905]. Pour une étude comparative de ces trois contributions, voir Paty [1993], chap. 2. Sur la pensée de Poincaré du principe de relativité, voir Paty [1996, à paraître, a].

⁹¹ Cf. Paty [1993], p. 176 ; [1987, 1999b, sous presse, b].

⁹² Paty [1993], chap. 3, p. 93.

Ces précisions contribuent à illustrer la question de l'historicité des contenus de connaissance en laissant voir les relations entre, d'un côté, l'adoption de *terminologies* pour désigner des *contenus scientifiques* et, de l'autre, le caractère idiosyncratique de ces derniers dans leurs gestations particulières ainsi que dans leurs transformations. On voit aussi comment, sous chacun de leurs états, ces contenus sont l'objet de *relations structurelles*, dans des conceptions théoriques mais aussi dans des schèmes mentaux plus généraux, qui contribuent à orienter le travail scientifique⁹³.

Ajoutons qu'Einstein n'adopta systématiquement l'expression "théorie de la relativité" qu'en 1911⁹⁴. A ce moment-là, la perspective qu'il avait esquissée dès 1907 vers la généralisation du principe de relativité prenait corps, et le rôle du principe de relativité y apparaissait plus que jamais fondamental, avec le projet de parvenir à une théorie dynamique, celle de la gravitation.

7

LE PRINCIPE DE RELATIVITE GENERALISE ET LA THEORIE DE LA GRAVITATION

Il nous resterait maintenant à évoquer le "troisième stade du principe de relativité", qui est celui de la théorie de la relativité générale. Toujours en nous en tenant à notre perspective, nous n'en mentionnerons, de manière seulement allusive, que quelques uns des aspects essentiels, qui reprennent des éléments épars des conceptions précédentes, et font subir encore des transformations majeures aux conceptions de la physique.

Avant de parvenir à la formulation de sa théorie, Einstein en brossa le programme, dès 1907, avec une étonnante lucidité conceptuelle⁹⁵. Il s'agissait de dépasser la limitation du concept de référentiels d'inertie - étant donné que ceux-ci ne sont tels que par notre choix, en rapport à toutes sortes d'autres mouvements possibles dans la nature -, par une généralisation du principe de relativité à tous les mouvements accélérés quelconques.

Il s'agissait en même temps de poser le problème de la nature et de l'origine de la masse inertielle et de son rapport à la masse gravitationnelle. Einstein formula à ce sujet, par ce qu'il qualifia plus tard "l'idée la plus heureuse de ma vie", le principe d'équivalence de la masse d'inertie et de la masse gravitationnelle (que nous avons évoqué plus haut), en repensant un résultat d'observation de Galilée et une conceptualisation de Newton. Cette équivalence devint celle d'un mouvement uniformément accéléré et d'un champ de gravitation uniforme.

Ces transformations dans les relations de concepts faisaient entrevoir, par la généralisation du principe de relativité, l'obtention d'une théorie dynamique de la gravitation (engendrée par les sources que sont les masses d'inertie). D'un

⁹³ Sur ce point, je renvoie à la notion de "programme épistémologique" (Paty [1988], chap. 1), et à celle de style scientifique (Paty [1993], chap. 1).

⁹⁴ Einstein [1907b, 1911].

⁹⁵ Einstein [1907a]. Voir, en part., Pais [1981].

autre coté, la relativité pour les mouvements accélérés permettait de dépasser l'absence de consistance physique de l'*espace-temps* sans éther de la relativité restreinte (qui en faisait un autre absolu, indépendant des corps, influant sur les corps sans être influencé par eux, caractère non physique, autant que l'espace absolu de Newton). Ainsi pourrait être aboli *le dernier concept absolu* que contenait encore la théorie de la relativité restreinte, à savoir l'*espace-temps (quasi-euclidien)* comme cadre des phénomènes, indépendant d'eux.

On doit souligner l'importance centrale, dans la mise en place des concepts de la théorie de la relativité générale, d'une critique permanente de l'espace absolu, Einstein méditant sur la nature de la masse d'inertie, et reprenant ce qu'il appela le "principe de la relativité de l'inertie", ou "principe de Mach", en le modifiant et en le transcendant vers l'idée de *covariance générale*, conçue comme une sorte d'autoréférence du champ, non rapporté à un système de coordonnées spatio-temporelles particulier⁹⁶.

Le pas principal vers la solution, une fois le problème physique posé, fut franchi lorsque Einstein adopta (en 1912) le formalisme mathématique de l'espace-temps quadri-dimensionnel de Minkowski et le calcul tensoriel ou calcul différentiel absolu de Gregorio Ricci-Curbacastro et de Tullio Levi-Civita, pour exprimer la condition de covariance générale, indépendante de coordonnées particulières. La solution serait obtenue comme structure variable de l'espace-temps, exprimée par le tenseur métrique, donnant les composantes du champ de gravitation. La théorie était capable d'expliquer des phénomènes jusqu'alors sans solution (l'avance séculaire du périhélie de Mercure de 43" d'arc, observée par Urbain Le Verrier), et de prédire des effets qui seraient constatés peu après (courbure des rayons lumineux passant au voisinage des grandes masses, observée en 1919, décalage vers le rouge du spectre lumineux dans un champ de gravitation)⁹⁷. Ces prédictions devaient se multiplier par la suite, concernant les objets de l'Univers aussi bien que l'Univers lui-même, devenu par elle objet de science (la cosmologie, comme théorie de l'Univers structuré par la dynamique des champs de gravitation, et soumis à une évolution temporelle...).

8

DERNIERES REMARQUES

Si nous regardons en arrière le parcours suivi au cours des "trois stades du principe de relativité", il semble que l'énoncé de quelque chose comme un principe de relativité (explicitement formulé ou non) s'accompagne toujours, pour être suivi d'effets théoriques, de l'énoncé d'un autre principe au moins dont il apparaît solidaire. Pour la première phase, on voit d'abord la relativité des mouvements être précédée de l'énoncé du principe d'inertie ; on voit ensuite d'autres principes intervenir, comme ceux qui fournissent les lois du choc. Ce sont dans tous les cas des principes dynamiques. La seconde phase, si on n'y considère

⁹⁶ Voir Paty [1993a], chap 5.

⁹⁷ Cf. Pais [1981], chap. 4 ; Howard & Stachel [1989] ; Eisenstaedt & Kox [1992] ; Paty [1993a], chap. 5.

que la contribution d'Einstein, voit le principe de relativité pour les mouvements d'inertie s'accompagner du principe de constance de la vitesse de la lumière dans le vide, pour que soient établies les conditions de son application (la réforme de la cinématique). (Et, pour les travaux de Lorentz et de Poincaré, on voit, lorsqu'ils retiennent le principe de relativité, l'association aux principes, non nécessairement explicites, qui sont inhérents à la dynamique). La troisième phase juxtapose au principe de relativité pour les mouvements accélérés quelconques le principe d'équivalence de la masse d'inertie et de la masse gravitationnelle, ce dernier fournissant la condition physique de l'application du premier principe, à savoir l'équivalence locale d'un champ de gravitation uniforme et d'un mouvement uniformément accéléré.

Nous avons laissé en suspens les implications plus récentes du principe de relativité, dans les diverses théories où il est mis en œuvre, qu'il s'agisse de théories du champ continu, ou de théories quantiques, ou de problèmes de nature cosmologique posés dans chacune de ces deux directions. Mais on verrait encore, dans ces utilisations du principe (ou de ses formulations équivalentes comme la *covariance* des grandeurs et des équations), intervenir une autre proposition fondamentale, par exemple sous la forme d'une règle de conservation, d'un *principe de symétrie*. C'est que le principe de relativité sert depuis lors, en physique, à formuler une dynamique, exprimée "dans son essence", pour ainsi dire, par quelque propriété principielle.

On mesure à cet égard combien le statut de la théorie d'Einstein de 1905, la *théorie de la relativité restreinte*, était particulier, puisque le second principe invoqué, pris pour résumer une propriété dynamique (la constance de la vitesse de la lumière, conçue comme d'origine électromagnétique), ne servait en fait qu'à reformuler le principe de relativité lui-même, avec un espace-temps imbriqué. Cette circonstance spéciale peut être rapportée à la nature physique profonde de la vitesse de la lumière : n'est-elle pas, au fond, la vitesse de la lumière, que dans la mesure où elle est avant tout la *constante de structure de l'espace-temps* ? Cela fait peut-être mieux sentir l'espèce d'état intermédiaire qu'est la "théorie de la relativité restreinte", dénuée de dynamique mais préparant le cadre des dynamiques ultérieures (par la mise en place d'un continuum d'espace-temps que la physique remplirait).

On ne saurait trop souligner, à ce sujet, une autre innovation fondamentale, conçue, cette fois, par Poincaré, avant Einstein, mais reprise par ce dernier à partir de sa théorie de la relativité générale, et par tous les physiciens depuis lors quand ils veulent construire une théorie dynamique des interactions des particules et des champs. Le principe de relativité, ou la condition de covariance, impose une restriction sur les formes possibles du lagrangien d'interaction. La méthode fut étendue depuis aux autres principes de symétrie ou d'invariance. Nous avons, par ce qui précède, constaté ses origines lointaines, et suivi un peu le processus de sa lente constitution.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRAHAM, Henri et LANGEVIN, Paul [1905]. *Les quantités élémentaires d'électricité : ions, électrons, corpuscules*, Gauthier-Villars, Paris, 2 vols., 1905.
- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1743]. *Traité de dynamique*, David, Paris, 1743. 2ème éd., modif. et

augm., David, Paris, 1758.

- [1744]. *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*, David, Paris, 1754 ; ré-éd. Culture et Civilisation, Bruxelles, 1966.

- [1749-1752]. *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*, David, Paris, 1752 ; ré-éd. Culture et Civilisation, Bruxelles, 1966. (Le manuscrit original en latin, soumis au concours de l'Académie de Berlin, date de 1749).

- [1754]. Dimension, in Diderot, d'Alembert [1751-1772], vol. 4 (1754), p. 1009-1010.

D'ALEMBERT, Jean le Rond et DIDEROT, Denis (éds.), [1751-1772]. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780.

ARAGO, François [1810]. Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut, le 10 décembre 1810, *Compte rendus des séances de l'Académie des sciences* (Paris), 36,1853, 38-49.

- [1830]. Fresnel (Notice biographique), in Arago [1854-1858], vol. 1, p. 155-156.

- [1854-1858]. *Oeuvres complètes*, publiées sous la dir. de J.-A. Barral, 10 vols., Gide & Baudry, Paris/Weigel, Leipzig, 1854-1858.

BURIDAN, Jean [vers 1340 a]. *Questiones super libris quattuor de caelo et mundo*, (*Questions sur les Livres du Ciel et de la Terre*), éd. E. A. Moody, Cambridge (Mass.), 1942.

- [vers 1340 b]. *Questiones super octo phisicorum libros Aristotelis* (Ms, Paris, BN), Paris, 1509.

CLAGETT, Marshall [1959]. *The science of Mechanics in the Middle Ages*, The University of Wisconsin Press, Madison, 1959.

DESCARTES, René [1644]. *Principia philosophiæ*, 1ère éd. princeps, Louis Elzevier, Amsterdam, 1644 ; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 8, p. 1-353. Trad. en français (1647), *Principes de la philosophie*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 9, p. 1-362.

- [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1ère éd., 1896-1913) ; nouvelle édition révisée, 1964-1974 ; ré-éd., 1996. (AT).

DRAKE, Stillman [1957]. *Galileo*, Oxford University Press, Oxford, 1980. Trad. de l'anglais par Jean-Paul Sheidecker, *Galilée*, Actes Sud, 1986.

DUHEM, Pierre [1906-1913]. *Etudes sur Léonard de Vinci*, 3 vols., Paris, 1906-1913.

- [1913-1959]. *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, 10 vols., Paris, 1913-1959.

EINSTEIN, Albert [1905a]. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, 17, 1905, 891-921. (CW, 2, p. 276-306). Trad. fr., Sur l'électrodynamique des corps en mouvement, OC, 2, p. 31-58).

- [1905b]. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?, *Annalen der Physik*, ser. 4, 18, 1905, 639-641. (CW, 2, p. 312-314). Trad. fr., L'inertie d'un corps dépend-elle de sa capacité d'énergie ?, OC, 2, p. 60-62.

- [1907a]. Ueber das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrbuch der Radioaktivität*, 4, 1907, 411-462 ; 5, 1908, 98-99. Egalement in [1987-1998], vol. 2, p. 433-488. Trad. fr.: Du principe de relativité et des conséquences tirées de celui-ci, in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 84-124.

- [1907b]. Bemerkung zur Notiz des Herrn P. Ehrenfest : "Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz", *Annalen der Physik*, ser. 4, 23, 1907, 206-208. Trad. fr.: Remarques sur la note de M. P. Ehrenfest : "Translation des électrons déformables et loi des aires", in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 74-75.

- [1915]. Zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1915, part 2, 778-786; 799-801.

- [1916]. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, ser. 4, 49, 1916, 769-822. Trad. fr., Les fondements de la théorie de la relativité générale, in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 179-227.

- [1946]. Autobiographisches. Autobiographical notes (1946), in Schilpp, P.A. (ed), *Albert Einstein, philosopher and scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle

(Ill.), 1949, p. 1- 95. Trad. fr., *Eléments autobiographiques*, in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 19-54.

- [1956]. *Lettres à Maurice Solovine. Briefe an Maurice Solovine*, reprod. en fac-simile, et trad. en fr. par Maurice Solovine, Gauthier-Villars, Paris, 1956. Ré-éd., Veb Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1960.

- [1987-1998]. *The collected papers of Albert Einstein*, éd. sous la dir. de John Stachel puis de Martin J. Klein, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987-1998. 8 vols parus. (CW)

- [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud *et al.*, édition publiée sous la dir. de Françoise Balibar. Seuil/éd. du CNRS, Paris, 1989-1993, 6 vols. (OC)

EINSTEIN, Albert, LORENTZ, Hendryk A., MINKOWSKI, Hermann, WEYL, Hermann [1923], *The principle of relativity*, with notes by Arnold Sommerfeld, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923 ; rééd., Dover, New York, 1952. (éd. originale en alld, 1922. Une première éd. en alld, sans les textes sur la relativité générale, remonte à 1913).

EISENSTAEDT, Jean & KOX, A. J. (eds.) [1992]. *Studies in the History of General Relativity*, Birkhäuser, Boston, 1992.

FIZEAU, Hyppolite [1851]. Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse à laquelle la lumière se propage dans leur intérieur, *Compte-rendu des séances de l'Académie des sciences* (Paris) 33, 1851, 349-355.

FRANKFOURT, U. & FRENK, A. [1976]. *Christiaan Huygens (1629-1695)*, Académie des sciences de l'URSS, Moscou. Trad. fr. par I. Sokolov, *Christiaan Huygens*, Mir, Moscou, 1976.

FRESNEL, Augustin [1818]. Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique, *Annales de chimie et de physique* 58, 1818 ; repris in Fresnel [1866-1870], vol. 2, 627-636.

- [1866-1870]. *Oeuvres complètes*, 3 vols., Imprimerie impériale, Paris, 1866-1870.

GALILEE (GALILEI), Galileo [1632]. *Dialogo sopra i due massime sistemi del mondo : tolemaico e copernicano*. Trad. fr. *Dialogues sur les deux grands systèmes du monde*, trad. par ?, Seuil, Paris, 1992.

- [1638]. *Discorsi e dimostrazione matematiche in torno di due nuove scienze*, Leyde, 1638. Trad. fr. par Maurice Clavelin, *Dialogues sur deux sciences nouvelles*, trad. A. Colin, Paris, 1970.

- [1890-1909]. *Le Opere*, éd. Naz, 20 vols. en 21 tomes, Firenze, 1890-1909.

GASSENDI, Pierre [1641]. *De motu impresso a corpore translato*, Paris, 1642 ; in P. G., *Opera omnia*, Lyon, 1658 (6 tomes), t. 3.

GHINS, Michel [1990]. *L'inertie et l'espace-temps absolu de Newton à Einstein. Une analyse philosophique*, Académie Royale de Belgique, Mémoires de la classe des lettres, T. 69, fasc. 2, Palais des Académies, Bruxelles, 1990.

GLICK, Thomas (ed.) [1987]. *The comparative reception of relativity*, Reidel, Dordrecht, 1987.

GRIMBERG, Gérard [1998]. *D'Alembert et les équations aux dérivées partielles en hydrodynamique*, Thèse de doctorat en Epistémologie et histoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, Paris, 14.12.1998.

GRIMBERG, Gérard & PATY, Michel [à paraître]. L'origine hydrodynamique du principe de d'Alembert.

HOWARD, Don & STACHEL, John (eds.) [1989]. *Einstein and the History of General Relativity*, Birkhäuser, Boston, 1989

HUYGENS, Christiaan [1654]. *De Motu Corporum ex Mutuo Impulso Hypothesis*, in Huygens [1888-1950], vol. 16, p. 336-343.

- [1690]. *Traité de la lumière*, Pierre van der Aa, Leyde, 1690 ; in Huygens [1888-1950], vol. 19.

- [1703]. *De Motu Corporum ex Percussione* (éd. posth., 1703), in Huygens [1888-1950], vol. 16, p. 30-91. (Du mouvement des corps sous l'effet d'une percussion, composé en 1656).

- [1888-1950]. *Oeuvres complètes*, 22 vols., Société Hollandaise des Sciences, Amsterdam, 1888-

1950.

KOYRE, Alexandre [1939]. *Etudes galiléennes*, Hermann, Paris, 1939, 3 vols. ; ré-éd. Hermann, Paris, 1966.

- [1965]. *Newtonian Studies*, Harvard University Press, Cambridge (Ma), 1965. *Etudes newtoniennes*, Gallimard, Paris, 1968.

LAGRANGE, Joseph-Louis [1788]. *Mécanique analytique*, Paris, 1788 ; 5ème éd., 2 vols., 1811 et 1816 ; ré-éd., Blanchard, Paris, 1965, et in Lagrange [1867-1892], vols. 11 et 12.

- [1867-1892]. *Oeuvres*, Gauthier-Villars, Paris, 14 vols, 1867-1892.

LANGEVIN, Paul [1904]. La physique des électrons (communication présentée au Congrès international des arts et des sciences, Saint Louis, Missouri, 23 septembre 1904), *Revue générale des sciences*, 15 mars 1905. Repris in Langevin [1923], p. 1-69.

- [1905]. Sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique, *Journal de physique*, 4, 1905, 165 et suiv. Repris in Langevin [1950], p. 313-328.

- [1911a]. L'évolution de l'espace et du temps, *Scientia*, 10, 1911, 31-54 ; repris in Langevin [1923], p. 265-300.

- [1911b]. Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne, *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, 12, 1911-1912, 1-46 ; également in Langevin [1923], p. 301-344.

- [1913a]. L'inertie de l'énergie et ses conséquences, Conférence à la Société Française de Physique, le 26 mars 1913, in Langevin [1923], p. 345-404.

- [1923]. *La physique depuis vingt ans*, Doin, Paris, 1923.

- [1950]. *Oeuvres scientifiques*, Ed. du CNRS, Paris, 1950.

LAPLACE, Pierre Simon [1796]. *Exposition du système du monde*, Paris, 1796 ; ré-éd. augm., 1835 ; rééd., Fayard, Paris, 1984.

LEIBNIZ, Gottfried, Wilhem [1703]. *Nouveaux essais sur l'entendement humain* (1703), Garnier/Flammarion, Paris, 1966.

- [1715-1716]. *Correspondance Leibniz-Clarke*, éditée par André Robinet, Presses Universitaires de France, Paris, 1954.

- [1875-1890]. *Die Philosophische Schriften*, ed par C.I. Gerhardt, 7 vols., Berlin, 1875-1890 ; rééd., Olms, 1978.

LORENTZ, Hendryk Antoon [1886]. De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux, *Verslage Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam) 2, 1886, 297 et suiv., et *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* 9, 1887, 103-176. Repris in Lorentz [1935-1939], vol. 4, p. 153-214.

- [1892a]. La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* 25, 1892, 363-553. Repris in Lorentz [1935-1939], vol. 4, p. 164-343.

- [1892b]. The relative motion of the Earth and the Ether, *Versl. Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam) 1, 1892, 74 et suiv. Repris in Lorentz [1935-1939], vol. 4, p. 219-223.

- [1895]. *Versuch einen Theorie der elektrischen und optiken Erscheinungen in bewegten Körpern*, Brill, Leiden, 1895. Egalement in Lorentz [1935-1939], vol. 5, p. 1-137. Trad. fr. d'extraits in Abraham et Langevin [1905], p. 430-476.

- [1904]. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen* (Amsterdam). *Proceedings of the section of science* 6, 1904, 809-831. Egalement in Einstein *et al.* 1923 (ed. 1952, p. 9-34). Egalement in Lorentz [1935-1939], vol. 5, p. 172-197. Trad. fr. par Paul Langevin : Phénomènes électromagnétiques dans un système qui se meut avec une vitesse quelconque inférieure à celle de lumière, in Abraham, Langevin [1905], p. 477-495.

- [1905]. Sur la théorie des électrons, in Abraham, Langevin 1905, p. 430-477. [Texte rédigé par Lorentz pour l'ouvrage collectif, reprenant des extraits de ses travaux de 1878, 1887, 1892, 1895, les reliant entre eux et les commentant.]

- [1909]. *The theory of electrons*, Columbia University Press, New York/ Teubner, Leipzig,

1909. 2nd ed., 1914.

- [1935-1939]. *Collected papers*, Nijhoff, La Haye, 9 vols., 1935-1939.

MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr. (sur la 4^{ème} éd. allemande) par E. Bertrand, *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Hermann, Paris, 1904 ; ré-éd., 1923.

MASCART, Eleuthère [1872]. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur, *Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 2^{ème} série, 1, 1872, 157-214.

- [1874]. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur (deuxième partie), *Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 2^{ème} série, 3, 1874, 363-420.

MAXWELL, James Clerk [1873]. *A treatise on electricity and magnetism* (1873) ; 3rd ed. (1891), 2 vols. Ré-éd., Dover, New York, 1954.

- [1876]. *Matter and motion*, London, 1876.

- [1890]. *The scientific papers of J.-C. M.*, Cambridge, 1890.

MAYRARGUE, Arnaud [1991]. *L'aberration des étoiles et l'éther de Fresnel, 1729-1851*, thèse d'épistémologie et d'histoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, Paris, 4.12.1991.

MICHELSON, Albert A. & MORLEY, Edward W. [1886]. Influence of motion of the medium on the velocity of light, *American Journal of Science*, 31, 1886, 261-270.

- [1887]. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether, *American Journal of Science*, 34, 1887, 333-345.

MILLER, Arthur I. [1981]. *Albert Einstein's special theory of relativity. Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1981.

MINKOWSKI, Hermann [1907]. Das Relativitätsprinzip (exposé présenté à Göttingen le 5.11.1907, publication posthume, par les soins de Arnold Sommerfeld), *Annalen der Physik*, 47, 1915, 927-938.

- [1908]. Raum und Zeit [exposé présenté à la 80^{ème} assemblée des scientifiques et médecins allemands, Cologne, 21.9.1908], *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 104-111. Trad. angl., Space and time, in Einstein et al. [1923], p. 73- 91.

NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Royal Society, London, 1687 ; 2^{ème} éd., 1713 ; 3^{ème} éd., 1726 : engl. transl. by Motte, 1729, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles Of Natural Philosophy and His System of the World*, éd. par Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, 2 vols., 1934 ; 1962.

- [1704]. *Opticks or a Treatise of the reflections, refractions, inflections, and colours of light*, London, 1704 ; 2^{ème} édition corrigée, 1721.

ORESME, Nicole [1377]. *Le Livre du Ciel et du Monde*, éd. A.D. Menut & A. J. Denomy, *Mædieval Studies*, vols. 3-5, 1941-1943.

PAIS, Abraham [1982]. *Subtle is the Lord. The science and life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982.

PATY, Michel [1977]. *Théorie et pratique de la connaissance chez Jean d'Alembert*, Thèse de doctorat en philosophie, Université des Sciences Humaines, Strasbourg, 1977.

- [1987]. The scientific reception of Relativity in France, in Glick [1987], p. 113-167.

- [1988]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.

- [1993]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

- [1994a]. Le caractère historique de l'adéquation des mathématiques à la physique, in Garma, Santiago, Flament, Dominique, Navarro, Victor (eds.), *Contra los titanes de la rutina.- Contre les titans de la routine*, Comunidad de Madrid/C.S.I.C., Madrid, 1994, p. 401-428.

- [1994b]. Sur l'histoire du problème du temps: le temps physique et les phénomènes, in Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994, p. 21-58; 2^{ème} éd., 1995; collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.

- [1994c]. Mesure, expérience et objet théorique en physique, in Beaune, Jean-Claude (dir.), *La mesure, instruments et philosophies*, Champ Vallon, Seyssel (01), 1994, p. 159-174.
 - [1995]. Newton, Isaac (1642-1727), *Encyclopædia Universalis*, vol. 12, 1995, p. 315-317. Repris dans *Encyclopædia Universalis, Dictionnaire des philosophes*, Encyclopædia Universalis/Albin Michel, Paris, 1998, p. 1111-1118.
 - [1996a]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
 - [1996b]. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470.
 - [1997]. Histoire rapide de la vitesse (le concept physique), in *La vitesse. Actes des 8èes Entretiens de la Villette*, Centre National de Documentation Pédagogique, Paris, 1997, p. 15-31.
 - [1998]. Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps, in Flament, Dominique (éd.), *Dimension, dimensions I*, Série Documents de travail, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 1998, p. 87-112.
 - [1999a]. La place des principes dans la physique mathématique au sens de Poincaré, in Jan Sebestik et Antonia Soulez (éds.), *Actes du Colloque Philosophie et Science au tournant du siècle: Mach, Boltzmann, Poincaré et Duhem, Paris, 29 mai-1er juin 1995, Fundamenta philosophiae* (Nancy) 3 (2), 1998-1999, 75-90.
 - [1999b]. Paul Langevin (1872-1946), la relativité et les quanta, *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 119, mai 1999, 15-20.
 - [sous presse, a]. Einstein et la pensée de la matière, in Monnoyeur, Françoise (éd.), *La matière des physiciens et des chimistes*, Paris.
 - [sous presse, b]. Langevin, Poincaré et Einstein, *Epistémologiques. Philosophie, sciences, histoire* (Paris, São Paulo), n°3-4, 1999 (numéro spécial : *Paul Langevin, son œuvre et sa pensée*).
 - [à paraître, a]. Poincaré et la relativité des mouvements pour l'optique, *Revue d'histoire des sciences*.
 - [à paraître, b]. Le coefficient de Fresnel et la vitesse de la lumière, *Revue d'histoire des sciences*.
- PAULI, Wolfgang [1921]. Relativitätstheorie, in *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, vol. 5, part. 2, Teubner, Leipzig, 1921, p. 539-775 ; également in Pauli 1964, vol 1, p. 1-237 (avec un supplément). Engl. transl., *Theory of relativity*, Pergamon Press, Oxford and New York, 1958.
- [1964]. *Collected scientific papers*, edited by R. Kronig and V.F. Weisskopf, 2 vols., Interscience/Wiley and sons, New York, 1964.
- PIETROCOLA, Mauricio [1992]. *E. Mascart et l'optique des corps en mouvement*, thèse d'épistémologie et d'histoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, 30.6.1992.
- POINCARÉ, Henri [1889-1891]. *Cours de physique mathématique. Leçons sur la théorie mathématique de la lumière*, Carré et Naud, Paris, vol. I, 1889 ; vol. II, 1891. (Cours à la Sorbonne de 1888 et 1890. Voir la ré-éd. revue et augm., Poincaré [1901]).
- [1895c]. A propos de la théorie de M. Larmor, *L'éclairage électrique* 3, 1895, 5-13, 285-295; 5, 1895, 5-14, 385-392. Repris in Poincaré 1950-1965, vol. 9, p. 369-426.
 - [1900a]. Sur les principes de la mécanique (Lecture faite au congrès international de philosophie tenu à Paris du 1er au 5 août 1900), *Bibliothèque du Congrès international de philosophie*, Vol. III, *Logique et histoire des sciences*, Armand Colin, Paris, 1901, p. 457-494. Egalement in Poincaré [1902] (chapitres 6 : La mécanique classique, et 7 : Le mouvement relatif et le mouvement absolu).
 - [1900b]. La théorie de Lorentz et le principe de réaction, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 2 ème série, 5, 1900, 252-278. Repris in Poincaré [1950-1965], vol. 9, p. 464-488.
 - [1901]. *Electricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques. Leçons professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899. Cours de physique mathématique*. Deuxième édition, revue et complétée par Jules Blondin et Eugène Néculcéa, Carré et Naud, Paris, Gauthier-Villars, Paris, 1901.

- [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902 ; ré-éd. augm, 1907; 1968.
 - [1904]. L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique, *Bulletin des sciences mathématiques* 28, 1904 (décembre), 302-324. [Conférence au Congrès international des arts et des sciences, Saint-Louis, Missouri, 24 septembre 1904]. Egalement dans Poincaré [1905a] [chapitres 7: L'histoire de la physique mathématique, 8: La crise actuelle de la physique mathématique, et 9: L'avenir de la physique mathématique], éd. 1970, p. 123-128, 129-140, 141-147.
 - [1905a]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905; 1970.
 - [1905b]. Sur la dynamique de l'électron (adunanza del 23 luglio 1905 [reçu le 23 juillet 1905]), *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* XXI, 1906, p. 129-176. Egalement in Poincaré [1916-1965], vol. 9, p. 494-550.
 - [1907a]. La relativité de l'espace, *L'année psychologique* 13, 1907, 1-17. Repris dans Poincaré [1908a], Livre 2, chapitre 1.
 - [1908]. *Science et méthode* (1908), Flammarion, Paris, 1908. Edition définitive, Flammarion, Paris, s.d.
 - [1908b]. La dynamique de l'électron, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 19, 1908, 386-402. Repris dans Poincaré [1913-1965], vol. 9, p. 551-586.
 - [1912a]. Les rapports de la matière et de l'éther, *Journal de physique théorique et appliquée*, 8 ème série, 2, 1912, 347-360. (Conférence faite le 11 avril 1912 aux séances de Pâques de la Société française de physique à Paris). Impr. Deslis frères, Tours, 1912, 16 p. Egalement in Poincaré 1913, éd. 1963, p. 68-83. Egalement in Poincaré [1913-1965], vol. 9, p. 669-682.
 - [1912b]. L'espace et le temps, *Scientia* 12 ème année, vol. XXV, 1912, 159-170 [Conférence faite le 4 mai 1912 à l'Université de Londres]. Egalement in Poincaré 1913, éd. 1963, p. 97-109.
 - [1913]. *Dernières pensées*, Flammarion, Paris, 1913; rééd. 1963.
 - [1916-1965]. *Oeuvres*, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1916-1965.
 - [1991]. *L'analyse et la recherche*, choix de textes et introduction de Girolamo Ramunni, Hermann, Paris, 1991.
- POTIER, Alfred [1874]. Conséquences de la formule de Fresnel relative à l'entraînement de l'éther par les milieux transparents, *Journal de physique théorique et appliquée*, 3 (1874), p. 201 et suiv.
- SZSCECINIARZ, Jean-Jacques [1998]. *Copernic et la révolution copernicienne*, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Flammarion, Paris, 1998.
- TONNELAT, Marie-Antoinette [1972]. *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris, 1972.
- VELTMANN, [1872]. Ueber die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien, *Poggendorf Annalen*, 110, 1872, p. 497 et suiv..
- VILAIN, Christiane [1993]. *Huygens et le mouvement relatif*, Thèse de Doctorat d'Epistémologie et Histoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, 1993.
- VOIGT, Woldemar [1887]. Ueber das Doppler'sche Prinzip, *Göttingen Nacht*. 14, 1887 ; également, *Physikalische Zeitschrift* 16, 1915, 381-386.
- WALTER, Scott [1996]. *Hermann Minkowski et la mathématisation de la théorie de la relativité, 1905-1915*, Thèse de doctorat en Epistémologie et histoire des sciences, Université Paris-7 Denis Diderot, 20.12.1996.
- WEYL, Hermann [1918]. *Raum, Zeit, Materie*, Berlin, 1918 ; 4ème éd., augm., 1921. Trad. fr. sur la 4ème éd. allde., par Gustave Juvet et Robert Leroy, *Temps, espace, matière. Leçons sur la théorie de la relativité générale*, Blanchard, Paris, 1922 ; Paris, 1979.
- [1923]. *Mathematische Analyse des Raumproblems*, Berlin, 1923.
- WHITTAKER, Edmund [1910]. *A History of the theories of aether and electricity : from the age of Descartes to the close of nineteenth century*, Longmans, Green and C°, London and New York, 1910 ; new ed. rev. and enlarged : *A History of the theories of aether and electricity, vol. 1 : the classical theories*, Nelson, London and New York, 1951.
- ZAHAR, Elie [1989]. *Einstein's revolution. A study in heuristics*, Open Court, La Salle (Ill.), 1989.