

in Piettre, Bernard (dir.), *Le temps et ses représentations*, coll. Les Rendez-vous d'Archimède, L'Harmattan, Paris, 2001, p. 79-106.

L'espace-temps de la théorie de la relativité

par

Michel PATY*

RÉSUMÉ.

L'espace-temps de la théorie de la relativité est une construction conceptuelle formulée pour rendre compte d'un certain ordre de phénomènes physiques. Avec la théorie de la relativité restreinte, le temps est mis dans la dépendance de lois générales des phénomènes qui sont l'objet de la mécanique et de l'électromagnétisme : il est constitué comme grandeur physique de manière à respecter le principe de relativité de la mécanique et la constance de la vitesse de la lumière indépendamment du mouvement de la source lumineuse, loi fondamentale de l'électromagnétisme. L'espace-temps ainsi construit lie indissociablement les coordonnées d'espace et le temps, sous le signe d'une causalité qui exclut les actions instantanées, mais il reste un cadre inaltérable pour les objets et les phénomènes physiques, lesquels sont sans influence sur lui qui les contient. Quant à la théorie de la relativité générale, elle modifie la signification physique de l'espace et du temps, dont elle fait de simples coordonnées dans une variété déformable. L'espace-temps, dont la structure est donnée non plus par les distances euclidiennes des corps rigides et les horloges invariables, mais par la forme du champ de gravitation. A partir de cette nouvelle construction, l'espace-temps n'est plus concevable comme un cadre indépendant des phénomènes et conditionnant ces derniers, mais comme, au contraire, déterminé par eux. La cosmologie moderne accentue ce caractère en montrant comment le temps (et, avec lui, l'espace-temps) voit sa signification physique déterminée à chaque étape de l'évolution de l'Univers par les lois qui gouvernent l'état de la matière dans les conditions correspondantes.

* Equipe REHSEIS (UMR 7596, CNRS et Université Paris-7-DenisDiderot, 37, Rue Jacob, F-75006 PARIS, FRANCE. Cour. électr.-e-mail : paty@paris7.jussieu.fr

1.

INTRODUCTION

On a souvent considéré la reformulation de l'espace et du temps des théories de la relativité (restreinte et générale, et surtout de la première) comme si cette réforme avait été pensée dès le début pour ces concepts considérés en eux-mêmes: la critique de leur acception en mécanique et en physique classique, qui précéda leur ré-élaboration, aurait été motivée par une conception "positiviste" de la définition des grandeurs en physique, qui soumet celle-ci aux conditions de l'observation et de la mesure. Selon cette interprétation, l'espace et le temps relativistes seraient physiques parce qu'ils peuvent être mesurés. Au contraire, l'espace et le temps de la physique classique (rapportés à des grandeurs "absolues") seraient idéaux et non physiques. Mais c'est là une manière très étroite de caractériser ce qui est physique en général comme de concevoir la nature de l'espace et du temps en physique, aussi bien classique que contemporaine. Cette façon de voir est, au surplus, anhistorique.

C'est à une réflexion - et peut-être à une méditation - sur la nature des concepts d'espace et de temps en tant qu'ils sont des grandeurs physiques que je voudrais vous inviter, en examinant les circonstances de l'élaboration de la théorie de la relativité (restreinte et générale), telles qu'elles ont eu effectivement lieu, comme faits d'histoire. Nous serons amenés à constater que le temps et l'espace, et leur intégration structurelle en forme d'espace-temps, ont été construits en relation aux phénomènes physiques et en fonction de ceux-ci, même si l'on peut encore les considérer - jusqu'à un certain point - comme le cadre de la représentation de ces phénomènes.

En quelque sorte, ce qui se présente à nous en premier lieu, ce sont les phénomènes - non la mesure -, et le temps et l'espace en termes desquels nous représentons ces phénomènes sont construits de manière à être adéquats à la représentation de ces derniers. Telle nous paraîtra être la leçon de la théorie de la relativité sous ses deux étapes, prolongée sous une forme plus frappante encore par les théories contemporaine de la matière (et non plus seulement de la gravitation) et de la cosmologie. Cette leçon, tirée de l'histoire, serait éclairée autrement, mais parfaitement confirmée, si l'on s'attachait, au lieu des circonstances historiques de la construction, à la signification physique de ces grandeurs telle que ces théories, considérées dans leur formulation actuelle, la donnent¹.

Nous n'insisterons pas, ici, sur la dualité de perspective, pour une théorie donnée, de l'approche historique et de l'approche "structurale", qui s'intéresse à la forme "reconstruite" du système de la théorie et de ses concepts après l'élaboration. Les philosophes contemporains ont souvent, à la suite du positivisme et de l'empirisme logiques, privilégié cet état qui correspondrait à la "justification" par opposition à celui de la "découverte", d'où ils ont inféré des

¹ Cf. Paty [1993].

problèmes et des considérations sur la nature de la connaissance scientifique qui apparaissent davantage construits de toutes pièces qu'effectivement posés par l'activité réelle de la recherche scientifique, tant d'hier que d'aujourd'hui. L'aspect purement structurel et logique d'une théorie ignore la dimension qui correspond à l'évolution de ses concepts, dont ses contenus sont indissociables, et l'attention unilatérale pour cet aspect déforme la nature des questions effectivement soulevées².

Cependant, la considération des contenus physiques des concepts ou grandeurs, par-delà leur simple forme mathématique, permet de reconstituer les relations réelles qui existent entre ces grandeurs, et d'éviter les déformations mentionnées. C'est ce qu'on pourrait montrer en prenant l'espace-temps de la théorie de la relativité, et en examinant la signification physique - c'est-à-dire exprimable en termes de phénomènes - de grandeurs telles que les distances spatiales ou les durées. En Relativité restreinte, par exemple, la dilatation des durées dans un système en mouvement relatif est rapportée à des phénomènes physiques tels que, par exemple, la désintégration de rayons cosmiques dans leur traversée de l'atmosphère ou de particules élémentaires produites dans des accélérateurs, qui permettent, précisément, les déterminations des durées de vie de ces particules. En Relativité générale, les distances et les durées sont également toujours rapportées, dès qu'il est question de leur signification physique, à des phénomènes comme ceux liés à la présence d'un champ de gravitation (par exemple, la variation de la période de la planète Mercure). Ce sont les phénomènes physiques, et non pas "la mesure", qui servent à exprimer les contenus physiques des grandeurs, et le fait même que ces grandeurs ont un contenu physique³.

Cela dit, il reste à savoir, bien entendu, quelle relation exacte entretiennent les grandeurs considérées et les phénomènes : ces derniers ne font-ils que manifester les contenus des premières, ou en sont-ils constitutifs ? C'est cette question même que nous nous proposons d'aborder, en nous attachant surtout aux circonstances historiques de l'élaboration des concepts d'espace et de temps dans leur acception selon chacune des deux théories de la relativité : montrant que ces concepts sont construits, et non pas "donnés", et qu'ils le sont en référence aux phénomènes, quoique sous des formes significativement différentes pour la Relativité restreinte et pour la Relativité générale.

Il sera utile, chemin faisant, de revenir - brièvement - aux conceptions de la physique et de la mécanique classiques, pour voir si un tel caractère, qui semble rompre fondamentalement avec elles, ne s'y trouvait cependant pas en germe. L'espace et le temps de Newton et de la physique classique, tout en étant "absolus et mathématiques" et constituant un cadre inaltérable pour les phénomènes, ne seraient-ils pas, malgré tout, tributaires - sous une forme à préciser - des formes physiques qui viennent emplir ce cadre ? Le contenant était-il tout à fait indépendant des contenus ? Du moins verrons-nous, grâce encore à l'évocation des

² Paty [1992]. Sur les déformations que cela occasionne sur la logique des problèmes, cf. Paty [1994a]. Cf. Paty [1993].

³ Cf. Paty [1994a].

circonstances historiques de l'élaboration, que la pensée du contenant n'était pas indépendante de celle du contenu. Car le temps newtonien n'est pas seulement mathématique et absolu. Bien que défini comme durée, s'il est aussi pensé comme instantané, et construit par le moyen du calcul différentiel, c'est bien en fonction d'une pensée physique du mouvement des corps.

2

CONSTRUCTION DU TEMPS PHYSIQUE ET DE L'ESPACE EN RELATIVITÉ RESTREINTE

Dans l'élaboration par Einstein de la théorie de la relativité restreinte⁴, la reformulation des concepts de temps et d'espace n'intervient qu'à titre de solution, trouvée en fin de parcours - et tardivement -, d'un problème physique sur lequel sa réflexion s'était exercée depuis longtemps, à savoir : la conciliation de l'électrodynamique de Maxwell et Lorentz⁵ avec le principe de relativité de la mécanique (qui concerne les mouvements d'inertie, c'est-à-dire uniformes et rectilignes). Le temps et l'espace sont à première vue absents de la formulation du problème tel qu'Einstein le posait, et qui est en gros la suivante : la théorie électrodynamique de Maxwell et Lorentz doit être modifiée pour être adaptée au principe de relativité, puisque les phénomènes électromagnétiques et optiques paraissent obéir exactement à ce principe.

Cette exigence, Einstein la concevait, d'une certaine façon, dans les termes d'une confrontation entre deux théories physiques, la mécanique et l'électromagnétisme. Au lieu de penser les réduire l'une à l'autre (dans l'une ou l'autre des directions pensées alors, soit une réduction à la mécanique, soit une réduction à l'électromagnétisme), il imagina de les reformuler l'une par l'autre, en prenant de chacune un caractère fondamental et universel dont la validité devait transcender les détails particuliers de ces théories et leurs limitations.

De la mécanique, il retint le principe de relativité (vérifié par les phénomènes, et formulé explicitement au dix-septième siècle par Huygens) et en fit une proposition générale, dont la validité s'impose au-delà de la seule mécanique, dès lors qu'il y a lieu de considérer des mouvements. De l'électromagnétisme, il garda comme une propriété théorique fondamentale la constance de la lumière indépendamment du mouvement de sa source, pilier de la théorie de Maxwell-Lorentz. Or ces deux propriétés, qu'il érigea en principes, admises comme vraies chacune pour sa théorie d'origine, apparaissaient incompatibles si on les considérait ensemble, et ceci bien que les phénomènes électromagnétiques respectassent toujours la relativité des mouvements d'inertie (induction de Faraday pour un aimant

⁴ Einstein [1905].

⁵ Maxwell [1873], Lorentz, [1895].

et un conducteur en mouvement, absence d'anisotropie de la vitesse de la lumière en fonction du mouvement de la Terre). La raison de leur incompatibilité était la présence, dans la conception de la théorie électromagnétique, du référentiel privilégié de l'éther - lié à l'espace absolu -, support des champs électrique et magnétique et substratum des vibrations dans la propagation de la lumière et des ondes électromagnétiques. Le second principe considéré par Einstein (la constance de c) était, selon la théorie de Maxwell-Lorentz, valide dans le seul système de l'éther, ce qui était contraire à l'équivalence des systèmes d'inertie, c'est-à-dire au principe de relativité.

L'analyse de l'incompatibilité entre ces deux principes amena Einstein à considérer la présence implicite d'une troisième proposition: celle de l'addition galiléenne des vitesses (dans le cas considéré, il s'agit de la vitesse de la lumière et de celle du mouvement d'entraînement). Si on l'abandonnait, pour la remplacer par une addition ou composition des vitesses différente et qui soit conforme aux deux principes choisis, ces derniers, par construction, ne seraient plus, dès lors, incompatibles. Einstein trouva la solution dans une redéfinition de l'espace et du temps, et par conséquent des vitesses, telle que ces deux grandeurs respectent les deux principes. Cette reformulation se fondait sur les critiques de l'espace absolu faites par Ernst Mach et sur les remarques contre le caractère absolu du temps proposées par Mach, ainsi que par Henri Poincaré⁶. Mach et Poincaré demandaient de considérer que ces concepts nous sont connus par les propriétés des corps et des phénomènes physiques et ne doivent rien comporter qui échappe à cette considération, à moins d'être arbitraires.

Einstein ne se contenta pas de la critique et formula une reconstruction de ces concepts en termes de leur signification physique, c'est-à-dire en termes de certaines propriétés fondamentales des phénomènes physiques auxquels ils sont potentiellement ou effectivement liés, du moins de celles dont leur définition même est directement tributaire, c'est-à-dire les deux principes considérés.

La construction du temps physique et de l'espace en Relativité restreinte est essentiellement caractérisée par la soumission de ces grandeurs, dès leur définition, au principe de relativité (exprimant un trait fondamental des lois de la mécanique, et un caractère général des phénomènes optique et électromagnétiques des corps en mouvement) et au principe de constance de la vitesse de la lumière (propriété fondamentale de la théorie électromagnétique de la lumière). Je ne reviendrai pas ici de manière détaillée sur cette construction où intervient la considération des significations physiques (c'est-à-dire des contenus, en termes de traits de phénomènes physiques) des grandeurs temps et espace, d'abord considérées pour un point et un instant donnés puis, dans un même référentiel, en des temps et des lieux différents, ce qui oblige à prendre en compte, pour l'estimation des durées, la synchronisation des horloges, et enfin dans des référentiels en mouvement relatif.

Deux traits caractérisent cette reconstruction : d'une part, la

⁶ Ernst Mach [1883], Henri Poincaré [1898,1902,1905a].

signification physique des coordonnées d'espace et des distances est donnée en termes de corps rigides (qui constituent la base originelle des conceptions de la géométrie euclidienne) et celle du temps et de la durée, en termes d'horloges invariables ; d'autre part, ces grandeurs sont soumises aux deux principes choisis, dès lors que l'on considère un mouvement relatif des systèmes de référence.

Ces conditions de définition et de relations entre les coordonnées d'espace et les temps ont pour conséquence directe la "critique de la simultanéité", c'est-à-dire que les jugements de simultanéité entre des événements ne sont pas absolus mais relatifs au mouvement d'entraînement du système de référence auquel ils sont rapportés. Plus généralement, les formules de transformation (de Lorentz⁷) pour les coordonnées d'espace et le temps dans des référentiels en mouvement (inertiel) relatif peuvent être directement déduites de la seule formulation de ces conditions ; et le caractère physique des grandeurs telles qu'elles ont été définies a pour corollaire le caractère physique des grandeurs transformées et des relations obtenues qui les caractérisent, faisant apparaître des propriétés inédites comme la contraction des longueurs et la dilatation des durées⁸. Ces propriétés physiques de l'espace et du temps sont en vérité aussi bien l'expression des propriétés spatio-temporelles des objets et des événements physiques, impliquées par l'invariance des lois de la mécanique et de l'électromagnétisme sous les transformations de Lorentz, qui résultent de cette nouvelle conception. En effet, si l'espace et le temps demeurent le cadre de la représentation des phénomènes physiques, il s'agit désormais d'un cadre construit 'sur mesure', c'est-à-dire en conformité à certains caractères généraux de ces phénomènes (résumés par les deux principes mentionnés).

A ce stade de la réforme du temps et de l'espace par la théorie de la relativité restreinte, ces deux concepts ont perdu leur caractère absolu, et en même temps leur indépendance mutuelle : ils sont reliés entre eux à travers l'espace-temps (formulé par Minkowski sur la base des résultats d'Einstein et des travaux de Poincaré⁹). Mais cet espace-temps reprend à son compte, pour ainsi dire, le caractère de cadre absolu pour les phénomènes qu'avaient auparavant l'espace et le temps séparés. Le temps et l'espace sont encore le cadre inaltérable des phénomènes sous les espèces de l'espace-temps. En effet, les objets physiques qui sont conçus dans ce cadre et les phénomènes qui s'y déroutent ne l'affectent pas : la dynamique particulière (mécanique ou électromagnétique) des phénomènes et des propriétés des corps ou d'autres entités matérielles (comme les champs) le laisse indépendant d'elle, sans y induire de modifications.

Si l'espace-temps de la Relativité restreinte, en tant que cadre, est indépendant de la dynamique particulière des phénomènes et des propriétés des corps matériels, il reste que, par la manière dont il a été construit, il dépend de certaines propriétés générales des phénomènes (le principe de relativité pour les

⁷ Lorentz [1904].

⁸ Einstein [1905], Paty [1993].

⁹ Pour une étude comparative entre les approches respectives d'Einstein et de Poincaré sur la relativité, voir Paty [1993].

systèmes d'inertie et de la constance de la vitesse de la lumière). Ce trait constitue de fait une rupture très importante, et même radicale, par rapport au temps et à l'espace de la mécanique classique, dans la mesure où ces derniers n'étaient pas définis en fonction de propriétés - même générales - de phénomènes : comme l'espace et le temps absolus, ils étaient définis en eux-mêmes, sans référence aux corps, comme cadre supposé et nécessaire des phénomènes mécaniques¹⁰.

Mais, à côté de cette rupture, l'espace-temps de la Relativité restreinte reprend certains caractères de la définition newtonienne de l'espace et du temps. Tout d'abord, la continuité. Que ces grandeurs soient continues, cela tient à ce que, même si elles sont étroitement mêlées, elles sont pensées à partir de l'espace et du temps des corps, représentés par des grandeurs différentielles. Dans ce sens, elles se rattachent directement à la construction mathématisée de la mécanique classique, et la forme de leur mathématisation, celle du calcul différentiel, informe la manière dont leur contenu est pensé, c'est-à-dire leur signification. Par ailleurs, la forme de la métrique à quatre dimensions est analogue à celle de l'espace de la géométrie euclidienne¹¹ : l'espace-temps de la Relativité restreinte est 'quasi-euclidien', et implique une certaine 'rigidité', même si celle-ci n'est pas rapportée à l'invariance des distances de la géométrie euclidienne. Car la signification de la métrique spatio-temporelle à quatre dimensions¹² est différente de la métrique spatiale à trois dimensions : elle est non-définie positive, et la signification des 'distances' n'est pas simplement géométrique, mais spatio-temporelle¹³.

Pour résumer, nous dirons que la construction de l'espace et du temps, qui devient celle de l'espace-temps, de la Relativité restreinte, est faite, au contraire de ce qui avait été le cas pour le temps de la mécanique de Newton, à partir de propriétés générales des phénomènes physiques (mécaniques, optiques, électromagnétiques), à savoir les deux principes mentionnés, de relativité pour les systèmes d'inertie et de constance de la vitesse de la lumière. Comme tels, ces concepts sont physiques, et leurs propriétés physiques, déduites de leur forme construite, peuvent être testées. L'espace-temps reste cependant une abstraction, et il n'est physique qu'en tant qu'il représente l'expression des propriétés physiques de ses composants, à savoir l'espace des corps (propriétés géométriques, distances)

¹⁰ Aux remarques près que l'on trouvera plus loin sur la construction du temps instantané et du point matériel par le moyen du calcul différentiel.

¹¹ L'invariant (distance élémentaire) d'un espace euclidien à trois dimensions s'écrit : $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$, ou encore $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$ (GE, pour géométrie). L'invariant élémentaire de la Relativité restreinte est : $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - c^2 dt^2$ (RR). Ce qui, dans les notations quadri-dimensionnelles pour l'espace-temps de Minkowski (avec $x_4 = ict$), s'écrit $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$ [RR, EM].

¹² On doit à Henri Poincaré l'expression formelle du temps comme quatrième coordonnée imaginaire. Voir Poincaré [1905b] et Paty [1993].

¹³ La forme symétrique [RR, EM] (voir la note 11) masque en réalité une hétérogénéité du contenu physique de la quatrième dimension (temporelle) par rapport aux trois autres (spatiales). Cette hétérogénéité est marquée par l'intervention du nombre imaginaire i ($i = \sqrt{-1}$). La forme [RR] montre bien que ds^2 peut être négatif (ou nul), au contraire d'un invariant purement spatial ([GE] ou son extension à quatre dimensions en géométrie euclidienne).

et le temps (simultanéité relative et durée). Il reste un cadre pour les phénomènes, indépendant d'eux, excepté la structure relationnelle qui le constitue en espace-temps, déterminée par les principes physiques indiqués.

Il résulte de cette construction que le temps relatif à l'espace, c'est-à-dire l'espace-temps, de la relativité restreinte est un contenant constitué en dépendance des lois générales des objets et des phénomènes qu'il recèle. Ce trait, qui demeure par-delà les contingences de l'élaboration par des pensées particulières, marque, pour ainsi dire, la nécessité de l'espace-temps relativiste par rapport aux phénomènes qui lui sont reliés.

Il est possible, également, de caractériser la différence de statut entre l'espace et le temps de la physique classique et l'espace-temps de la relativité restreinte en considérant le point de vue de la mathématisation, c'est-à-dire du rapport entre la forme mathématique et la signification physique. Si l'on peut parler, à propos de l'élaboration faite par Newton, d'une "construction mathématique", celle d'Einstein sera mieux qualifiée par l'expression "construction physique mathématisée". Le temps et l'espace classiques sont des formes mathématiques (construites) appliquées ensuite à la physique (d'abord à la mécanique). L'espace-temps de la relativité restreinte est un concept physique construit et qui possède une représentation mathématique exacte (selon le groupe de transformation de Lorentz). Dans cette construction, le raisonnement se porte tout d'abord sur les concepts, correspondant à des grandeurs physiques, qu'il exprime par les grandeurs mathématiques usuelles ; les propriétés physiques générales (principes) informent le contenu physique de ces grandeurs, dans la mesure où leur prise en considération permet de déterminer les relations de ces grandeurs entre elles ; la déduction sur les formes mathématiques fait le reste, mais sans quitter la physique, où l'on se trouvait désormais. C'est cette manière de penser une théorie et ses concepts - typique au demeurant de ce que l'on est convenu de concevoir comme *physique théorique* - que nous appellerons *construction physique mathématisée*.

La théorie de la relativité générale nous fera voir une conception de nature quelque peu différente : une construction formalisée qui s'appuie sur des principes physiques (ou, du moins, ayant une portée physique), transcrits et pensés de manière formelle. J'entends ici «formel» comme l'insistance, dans un travail théorique, sur la forme mathématique, qui peut devenir l'un des éléments principaux du raisonnement. Les concepts ou grandeurs physiques perdent alors momentanément de leur sens concret au profit d'un raisonnement mathématique qui semble poursuivi pour lui-même¹⁴. Les conséquences du point de vue de la physique seront tirées ensuite par la transcription des grandeurs mathématiques en concepts physiques, ou par leur interprétation, quand cette transcription ne peut être directe.

¹⁴ Paty [1993], chap. 5.

3

**STRUCTURE DE L'ESPACE-TEMPS
DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE.
MATIÈRE ET DYNAMIQUE DES PHÉNOMÈNES**

Avec la transition vers la Relativité générale, en effet, l'espace et le temps se voient privés de leur signification physique usuelle, et rendus à l'état de simples variables mathématiques, exprimant des coordonnées par rapport à un système de référence arbitraire, dépourvu de signification particulière par rapport aux corps ou aux phénomènes. Comme tels, leur fonction n'est plus que d'exprimer les lois de transformation, comme s'ils étaient dès lors exactement accordés à la définition - et subordonnés à elle - de l'objet de la géométrie selon Poincaré, à savoir les propriétés des groupes de transformation. L'espace et le temps ne retrouvent une signification physique que par la médiation de la théorie qui s'établit à partir de ces propriétés mêmes - la théorie de la relativité générale. La 'charge physique' de cette théorie est donnée par le problème qui la fonde et qu'elle résout : le principe de relativité généralisé aux mouvements quelconques et la théorie des phénomènes dus au champ de gravitation.

Comme résultat, la modification que la théorie de la relativité générale fait subir aux concepts d'espace et de temps est encore plus radicale que la précédente, puisque, cette fois-ci, l'espace-temps n'est plus considéré comme indépendant des corps matériels qu'il contient. Sa structure n'est plus immuable et elle est donnée par la distribution de la masse-énergie des corps, autrement dit des champs de gravitation dont ces corps sont la source. Avec l'espace-temps matériel de la Relativité générale la dissociation entre le contenant et le contenu se voit abolie, les propriétés et la structure du premier se trouvant dépendre du second, c'est-à-dire des objets matériels et des phénomènes physiques auxquels ils donnent lieu. Les phénomènes liés à la gravitation ainsi qu'aux mouvements accélérés de toutes sortes déterminent les propriétés de l'espace-temps, dont la structure est donnée en chaque point par la métrique: celle-ci n'est plus 'quasi euclidienne' sauf, localement, dans le cas d'un champ nul ou très faible. La question se pose même de savoir ce que signifierait un espace-temps vide de tout champ; tien, sans doute, ne permettrait de le définir.

Je m'en tiendrai à évoquer rapidement quelques traits de la nouvelle conception, d'abord dans l'ordre de la genèse historique des idées - et des motivations qui y ont conduit -, ensuite en reprenant la question des significations et du contenu physique de ces grandeurs.

Ici encore, comme avec la Relativité restreinte, ce ne sont pas en premier lieu les concepts d'espace et de temps qui ont fait l'objet de la réflexion d'Einstein, et leur nouvelle reconstruction n'est apparue que comme la conséquence nécessaire d'un problème physique plus général - et, également, comme la condition de sa solution - : le problème de la nature du champ de gravitation, posé

dès 1907¹⁵, deux ans après la publication de la théorie de la Relativité restreinte. Pour le dire en quelques mots, ce problème présente un double aspect, directement issu d'une réflexion sur les caractères et les limites de la théorie de la relativité restreinte. Il se rapporte d'une part à une interrogation sur la nature de la masse d'inertie des corps et sur la constatation de son égalité avec la masse gravitationnelle ($M_I = M_G$)¹⁶, qui l'amène à énoncer un "principe d'équivalence" entre un champ de gravitation homogène et un mouvement uniformément accéléré (dont une image bien connue est l'expérience de pensée d'un ascenseur en chute libre, et qu'Einstein a lui-même résumée par une remarque frappante : "si quelqu'un tombe en chute libre, il ne se rend plus compte de son propre poids"). (Cette équivalence est seulement locale, en un point d'espace-temps donné, et non pas globale, mais il ne le réalisera que plus tard). L'autre aspect concerne la généralisation du principe de relativité à tous les mouvements et non plus à celui d'inertie seulement. L'exigence en est fondée sur une critique du privilège des systèmes d'inertie, dont la définition est à tout prendre de caractère subjectif car ils "n'existent pas dans la nature" - pourquoi, demande Einstein, la nature privilégierait-elle les systèmes d'inertie, qui ne sont tels qu'en fonction d'un choix de notre part ?

Le problème de la Relativité générale, qui est donc en même temps celui de la théorie du champ de gravitation, ne commence vraiment d'être résolu de manière théorique - dépassant les intuitions initiales - qu'à partir de la critique, faite par Einstein en 1912, de la signification physique des grandeurs d'espace et de temps telles que les considèrent la mécanique et la Relativité restreinte. Ce n'est pas d'abord l'indépendance de l'espace-temps par rapport aux corps qui est questionnée (ce sera la conséquence de la réforme), mais un aspect de l'espace et du temps classiques que l'espace-temps de la Relativité restreinte avait laissé sans modification leur signification physique directe à partir de l'expérience des corps. Les coordonnées spatiales indiquent les positions dans l'espace rapportées à des corps rigides (des règles unités) et le temps est rapporté à des horloges invariables, cette rigidité et cette invariabilité ayant lieu quelle que soit la localisation et l'état de mouvement (rectiligne et uniforme).

Or, cette conception de la signification physique des coordonnées d'espace-temps devait être abandonnée si l'on voulait résoudre le problème du champ de gravitation et de la relativité générale des mouvements, c'est-à-dire des lois physiques pour les mouvements accélérés. Einstein fut amené à ce nouveau stade de sa critique par la conjonction de plusieurs considérations décisives, qui font suite à celles constituant le programme à réaliser et formulant le problème à résoudre - la généralisation du principe de relativité aux mouvements accélérés quelconques et le principe d'équivalence.

L'une d'elles fut un nouveau pas dans sa réflexion sur la nature de l'inertie, qui le conduisit à formuler un "principe de la relativité de l'inertie", dont il trouva l'inspiration dans la critique de l'espace absolu newtonien effectuée par Ernst

¹⁵ Einstein [1907].

¹⁶ Cette égalité, constatée par Newton, remonte en fait à la loi de la chute des corps de Galilée.

Mach¹⁷ (il le qualifia d'ailleurs également de "principe de Mach"). Selon Mach, l'inertie ne peut être définie par rapport à l'espace absolu, mais seulement par rapport aux corps : elle est relative aux masses d'inertie des corps. Constatant par le calcul que la masse d'un corps d'épreuve situé au sein d'une sphère massive tournante varie (ce phénomène gravitationnel présente une analogie avec l'induction électromagnétique), Einstein y trouva matière à raviver son intérêt pour le principe de Mach, qu'il transcrivit à son usage en termes de champs, obtenant par là une prise sur la signification physique de l'idée de covariance générale : l'invariance du champ ne peut être posée qu'en fonction des autres champs, et non en termes d'un référentiel spatial. Le problème fondamental lui apparut alors clairement comme étant celui de la formulation de la covariance sous les transformations générales des coordonnées (un problème, dès lors, de nature essentiellement mathématique).

Une autre considération importante pour le mettre sur la voie de la solution fut occasionnée par la question, soulevée en termes de paradoxe par Ehrenfest, et portant sur les propriétés d'une barre rigide située sur un disque tournant. Le mouvement de rotation du disque peut être représenté à chaque instant et en chaque point par un mouvement d'inertie infinitésimal dans la direction de la tangente : l'application à la barre d'une série de transformations de Lorentz amènerait à conclure à la déformation de celle-ci dès lors qu'elle est considérée depuis le référentiel au repos. Certains y voyaient la preuve que les transformations de Lorentz de la Relativité restreinte ne sont qu'apparentes et non réelles ; d'autres considéraient que, puisqu'elles sont réelles, il fallait en rendre compte par les propriétés dynamiques de la barre tournante. Einstein résolut le problème en 1912, en reprenant sa conception de l'espace de référence, telle qu'il l'avait mise en oeuvre dans son élaboration de la théorie de la relativité restreinte : les distances considérées pour le corps en mouvement sont bien modifiées physiquement quand on observe celui-ci depuis le référentiel au repos, mais les distances correspondantes de son espace de référence sont modifiées en même temps. La propriété est cinématique et non dynamique : il en va de même pour la barre en rotation, dont l'espace de référence n'est plus rigide, c'est-à-dire euclidien. D'ailleurs, si l'on applique le raisonnement au disque lui-même, la transformation entraîne que le rapport de sa circonférence à son diamètre n'est plus π : le cercle n'est plus euclidien.

A sa préoccupation pour la question de la nature de l'inertie et à son souci de la signification physique des distances (et des durées) lié à sa conception propre d'une 'géométrie pratique' ou 'physique', dont les grandeurs désignent l'espace physique des corps, Einstein ajouta désormais, motivé par ces considérations, un intérêt neuf pour l'aspect mathématique de la formulation du problème de la Relativité généralisée. Il s'aperçut que la formalisation de l'espace-temps à quatre dimensions faite quelques années plus tôt par Minkowski pour la Relativité restreinte et l'utilisation du calcul différentiel absolu de Ricci et Levi-Civita, étaient immédiatement adaptés à l'expression de la covariance générale, c'est-à-dire à la résolution de son problème.

¹⁷ Mach [1883].

Il lui fallait, dans un premier temps, admettre que les coordonnées d'espace et de temps perdent leur signification physique habituelle (en termes de distances solides et d'unités de durée invariables), pour n'être que de simples paramètres mathématiques - pouvant être aussi bien les coordonnées que des fonctions de celles-ci - servant à représenter les mouvements et à exprimer les lois de transformation. (Il est intéressant de se souvenir, ici, de la définition que Poincaré donnait de l'objet de la géométrie . non pas l'espace, mais les propriétés des groupes de déplacement des corps dans l'espace). En quelque sorte, les coordonnées d'espace-temps se voyaient ramenées, à ce stade de la formulation du problème, à des variétés au sens de Riemann. La suppression de tout lien à la géométrie euclidienne et à l'idée de corps rigides les vouait à exprimer une géométrie quelconque. C'est ainsi que le problème physique de la covariance générale et du champ de gravitation se trouvait momentanément transformé en un problème de mathématiques (en fait, de pure géométrie). Le calcul différentiel absolu permettait de trouver les lois de transformation pour la covariance générale en termes de la structure métrique de l'espace-temps, c'est-à-dire des éléments de distance invariants $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$.

Les coefficients métriques $g_{\mu\nu}$, fonction des coordonnées d'espace-temps, donnaient le champ de gravitation en chaque point par l'équation d'Einstein $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \chi T_{\mu\nu}$ ¹⁸, à laquelle ce dernier parvint à la fin de l'année 1915, dès lors en possession de la solution complète du problème de la Relativité générale¹⁹. En chaque point d'espace-temps, les grandeurs spatiales et temporelle, données par la valeur du champ de gravitation - c'est-à-dire de la métrique en ce point - retrouvent désormais une signification physique, fournie par la théorie (la théorie relativiste du champ de gravitation ainsi construite) : celle de distances et de durées soumises au champ de gravitation en ce point. Deux des trois premières conséquences physiques directement testables de cette nouvelle conception du temps et de l'espace issue de la théorie de la relativité générale concernent directement les 'propriétés physiques du temps': l'avance séculaire du périhélie de la planète Mercure (qui a trait à sa période) et le retard des horloges (dilatation des durées)²⁰ dans un champ de gravitation, la troisième étant la courbure des rayons lumineux, qui exprime immédiatement une propriété de l'espace. (Mais cette distinction n'a rien d'absolu, puisque la grandeur fondamentale est l'espace-temps). De nombreuses autres conséquences les ont suivies plus tard, comme l'on sait, en particulier concernant des objets de l'astrophysique et de la cosmologie.

On voit par là comment le temps physique ainsi construit à travers la théorie de la relativité générale est déterminé par les phénomènes (en l'occurrence, ceux liés au champ de gravitation), qui, pour ainsi dire, le dissuadent de "couler uniformément", et comment ce 'contenant' est marqué dans sa forme même par son

¹⁸ Voir, p. ex., Einstein [1921]. $R_{\mu\nu}$ est le tenseur de Ricci, R la courbure scalaire, $T_{\mu\nu}$ le tenseur d'énergie-impulsion, χ une constante liée à la constante de gravitation.

¹⁹ Voir notamment Einstein [1916].

²⁰ Qui correspond au déplacement vers le rouge des longueurs d'onde des raies lumineuses.

contenu.

Cet aboutissement d'une évolution de nos conceptions sur le temps et sur l'espace, qui rend de plus en plus explicite leur caractère construit en référence aux phénomènes du monde physique ainsi que la soumission de leur contenu physique aux propriétés de ces phénomènes, connaît des prolongements plus marqués encore avec la cosmologie contemporaine. Dans la phase de l'histoire de l'Univers où la matière se trouve dans des états qui relèvent de la physique des particules élémentaires et des champs quantifiés, les échelles de temps sont directement structurées par les lois qui gouvernent les champs d'interaction en jeu²¹. Et l'on ne sait plus, en deçà du temps de Planck²², ce que le temps signifie physiquement, puisqu'on ignore tout de la théorie qui correspond à ce domaine de dimensions spatiales extrêmement petites et d'énergies immenses, où la gravitation doit être quantifiée. A plus forte raison peut-on douter que la notion de "temps zéro" - et de point initial - de l'Univers ait un sens. Le temps, comme l'espace, nous est donné par les phénomènes physiques et par les théories qui les représentent, et l'on peut fort bien imaginer que, dans certaines conditions physiques comme celles des époques de l'Univers qui nous échappent, il ne soit même plus une grandeur physique pertinente.

4

REMARQUES SUR LA CONSTRUCTION ET SUR LA RÉALITÉ DE L'ESPACE ET DU TEMPS DANS LA MÉCANIQUE CLASSIQUE.

Avec la physique - en premier, la mécanique - classique, toute épaisseur du temps (le fait que des événements particuliers se produisent à tel instant), encore présente dans les conceptions antérieures, est aboli! chaque instant, passé ou à venir - et même présent - se constitue en une entité abstraite, et leur succession - le cours du temps - se reconstruit à partir de la relation "instantanée", exprimée à l'aide de l'équation différentielle et des conditions initiales données ou supposées. Le temps comme grandeur est neutre, dépourvu de qualité, sans "odeur", sans accident, sans vécu circonstancié ou subjectif²³ : tous les instants du temps sont donnés pour équivalents. Il en est de même pour l'espace où s'inscrivent les trajectoires, équivalent en tous ses points. Le temps et l'espace abstraits, "absolus et

²¹ Sur ces aspects, de la cosmologie contemporaine, voir, en particulier, Andrillat [1993], Audouze, Musset & Paty [1990].

²² Ce temps a la valeur $t_p = 10^{-43}$ sec. La distance correspondante est $l_p = 10^{-19}$ cm, et l'énergie, ou "masse de Planck", est $m_p = 10^{19}$ GeV.

²³ C'est un temps "embouti" pour reprendre l'expression de Michel Debrun (conférence donnée à ce même colloque).

mathématiques", fonctionnent dès lors comme le cadre inaltérable des objets et des événements, qui ne peuvent exercer d'influence sur lui.

Tels étaient l'espace et le temps newtoniens, définis en eux-mêmes, sans relation aux phénomènes particuliers, ni à leurs propriétés générales, au contraire de ce que nous venons de voir pour l'espace-temps des théories de la relativité: ils étaient conçus comme le cadre naturel supposé et nécessaire des phénomènes. C'est, au fond, cette idée "fondatrice" que Kant reprit à sa manière en y voyant les formes a priori de la sensibilité, par lesquelles le sujet peut accéder à l'intelligibilité des phénomènes, et constitutives des conditions de possibilité de la connaissance²⁴. Cette idéalisation ou subjectivisation du temps et de l'espace les détache de leur caractère physique: une reformulation dans ce sens du temps newtonien se trouve déjà dans la genèse psychologique de l'idée de temps absolu de Locke²⁵, qui rattache l'idée de temps à celle de la succession des idées ou images mentales, et l'enlève par là-même à la considération des phénomènes de la nature. Il y a là une modification par rapport à la pensée antérieure de l'espace et du temps, conçus, comme on le voit par exemple chez Galilée et Descartes, en relation aux objets physiques et à leurs mouvements.

Cependant, cette radicalisation par les philosophes de l'indépendance du temps par rapport aux phénomènes, telle que la physique newtonienne la formulait, en laisse échapper une dimension importante. Car le temps et l'espace de la mécanique et de la physique classique, tout en étant conçus comme "absolus", constituent le cadre physique des phénomènes naturels ; ils sont donc, malgré tout, rattachés aux corps, et par là physiques, même si cette dimension n'apparaît pas de manière explicite dans les définitions. L'espace absolu de Newton est physique dans la mesure où il est à l'origine de la propriété d'inertie des corps, et la cause et le support des accélérations. Il est pensé dans ce sens par construction, malgré l'invocation de sa naturalité. De fait, l'espace, et aussi bien le temps, de la mécanique classique ne sont pas tant donnés comme naturels - "vrais et mathématiques" - que construits et mathématisés par construction. Telle sera la conception que s'en fera la physique - et la mécanique elle-même - après Newton, comme on le voit dans les élaborations et dans les commentaires de ses praticiens, du dix-huitième et du dix-neuvième siècle. Or, c'est dans les *Principia* de Newton que cette construction est faite, comme silencieusement, dans l'ombre des définitions qu'imprègne sa philosophie néoplatonicienne et qui la masque tout en la rendant possible²⁶.

Newton reprend l'idée que l'espace et le temps sont des grandeurs continues, et lie leur statut absolu à leur caractère mathématique. Mais il leur attribue en vérité quelque chose de plus, qui les rattache directement, dans leur mathématisation même, aux lois fondamentales du mouvement. En particulier, le temps dans les *Principia* n'est pas seulement "absolu, vrai et mathématique", il est aussi conçu, comme instantané, bien qu'il soit initialement défini comme flux

²⁴ Kant [1786, 1787].

²⁵ Locke [1690].

²⁶ Cf. Paty [à paraître].

continu. Le point matériel et le temps instantané, tels qu'ils apparaissent effectivement dans les considérations sur le mouvement des corps, sont bien construits - en même temps d'ailleurs que le langage mathématique qui les exprime - en fonction de la loi fondamentale de la dynamique que nous appelons aujourd'hui loi de causalité, et qui relie les états d'un corps mobile soumis à une force à deux instants successifs.

C'est essentiellement par là que se trouve assuré le caractère physique de ces grandeurs : les concepts d'espace et de temps de la mécanique newtonienne sont constitués - mathématiquement, par la pensée d'une géométrie des limites qui est équivalente au calcul différentiel - pour assurer la formulation mathématique des lois fondamentales du mouvement. Ils sont donc constitués en fonction d'une loi - à établir - des phénomènes.

La grande innovation des *Principia* de Newton, ouvrage fondateur de la mécanique comme science théorique, réside sans doute dans l'introduction de cette nouveauté conceptuelle fondamentale pour la physique qu'est le temps instantané, fixant les relations de causalité ; elle n'est pourtant nulle part explicite, et n'apparaît que rétrospectivement, dans son lien au calcul différentiel. C'est par la mise en oeuvre originale d'une géométrie des limites des rapports de grandeurs pour exprimer les relations mécaniques que le temps instantané fait son apparition masquée en physique.

La doctrine des "premières et dernière raisons" appliquée aux problèmes de mécanique est, en effet, constitutive de la notion de temps instantané, comme on le voit à l'expression même par laquelle Newton la justifie : "Par dernière raison [*ultimate ratio*] de grandeurs évanescences, il faut entendre la raison [le rapport] des grandeurs non pas avant qu'elles s'évanouissent, ni après, mais avec laquelle [*with which*] elles s'évanouissent"²⁷. Ce qui s'établit en même temps que la limite, c'est le temps instantané qui la fixe, comme moment de l'évanouissement, l'instant sans extension où les rapports de grandeurs (déplacements, forces, vitesses, accélérations) relatives au mouvement prennent la valeur considérée. Les résultats relatifs aux "dernières raisons des grandeurs" sont immédiatement appliqués à toutes sortes de problèmes où une loi du mouvement est donnée : par exemple, à la comparaison des aires balayées par un rayon. L'emploi de ces quantités finies que sont les limites de rapports est ainsi approprié, par construction, à l'étude de problèmes locaux et instantanés, c'est-à-dire du mouvement en un point d'une trajectoire à un instant donné.

Les problèmes de mouvement des corps qu'étudient les *Principia* portent effectivement sur des déterminations de trajectoires non pas globales (comme avec les travaux de Képler), mais locales et pour des instants donnés. Avec l'élaboration de la géométrie des limites et des mouvements instantanés, la causalité faisait son entrée en physique, du moins telle que nous la connaissons depuis lors, différente de ses formes archaïques et limitée à ce qu'en prescrivent les "règles du raisonnement en philosophie" qui ouvrent le livre 1, à savoir l'explication

²⁷ Newton [1687], p. 39 de l'édition utilisée (souligné par moi, M.P.).

(mathématique) des phénomènes: la causalité dans le sens différentiel, relative au rapport entre les états de mouvement d'un corps à deux instants successifs²⁸.

L'obscurité dans laquelle une telle nouveauté conceptuelle fait son apparition en physique est liée à la difficulté, connue déjà depuis les Grecs pour l'espace, à penser intuitivement la singularité ou la discontinuité (point, temps instantané) sur le fond conceptuel de la continuité (espace, durée ou flux du temps)-seul le calcul différentiel et intégral, sous les espèces du formalisme leibnizien adapté aux concepts newtoniens, permettra de penser clairement de tels concepts²⁹. C'est que leur signification physique, portée dans la manière opératoire dont ils sont conçus en fonction des lois à établir du mouvement, mais encore très implicite, ne peut être exprimée strictement que par les notions mathématiques correspondantes.

La construction ainsi effectuée du temps newtonien, et de même, de l'espace, pour les rendre adéquats au problème général des lois du mouvement des corps, constitue la condition fondamentale de la mathématisation de la mécanique. Mais, en même temps, l'espace et le temps physiques et mathématisés newtoniens doivent à leur définition initiale d'être aussitôt soustraits aux corps et aux phénomènes physiques - demeurant des grandeurs absolues - pour ne constituer que leur cadre idéal. Le mouvement esquissé par la construction de ces concepts en fonction des corps et des phénomènes pour en faire des grandeurs chargées d'une signification physique s'arrête ainsi, hésitant entre une pure idéalisation mathématique hétérogène au monde physique, et une implication plus directe qui les rapporte en dernier ressort à ce monde. De ces hésitations sont tributaires les différentes interprétations philosophiques qui en ont été données jusqu'aux réformes de la physique relativiste.

²⁸ Voir les riches réflexions d'Einstein sur ce sujet : Einstein [1927]. Cf. Paty [1987].

²⁹ D'Euler et d'Alembert à Lagrange. Cf., p. ex., d'Alembert [1743, 1758].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1743]. *Traité de dynamique*, David, Paris, 1743. 2ème éd., modif. et augm., David, Paris, 1758.
- [1758]. *Essai sur les éléments de philosophie ou sur les principes des connaissances humaines*, Paris, 1758. Rééd., suivi des *Éclaircissements à cet Essai* (de 1768), Fayard, Paris, 1987.
- ANDRILLAT, Henri [1993]. *L'Univers sous le regard du temps. La cosmologie théorique moderne et ses racines*, Masson, Paris, 1993.
- AUDOUZE, Jean, MUSSET, Paul, & PATY, Michel [1990]. *Les particules et l'Univers*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.
- EINSTEIN, Albert [1905]. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-92 1. Trad. fr. : Sur l'électrodynamique des corps en mouvement, in Einstein [1989-1993], vol. 2, *Relativités 1*, Seuil, Paris, 1993, p. 31-62.
- [1916]. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, ser. 4, XLIX, 1916, 769-822 ; trad. fr. : Les fondements de la théorie de la relativité générale, in Einstein [1989-1993], vol. 2, *Relativités 1*, Seuil, Paris, 1993, p. 179-227.
- [1921]. *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, Vieweg, Braunschweig, 1922. Trad. angl., par Edwin Plimpton Adams, *The Meaning of relativity : four lectures delivered at Princeton University*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1922. [Conférences Stafford, données à l'Université de Princeton en mai 1921]. Trad. fr. sur l'édition allemande de 1922 par Maurice Solovine : *Quatre conférences sur la théorie de la relativité faites à l'université de Princeton*, Gauthier-Villars, Paris, 1955.
- [1927]. Newtons Mechanik und ihr Einfluss auf die Gestaltung der theoretischen Physik, *Naturwissenschaften* 15, 273-276; trad. angl., in Einstein [1954c], p. 247-255 ; trad. fr.: La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique, in Einstein [1934b], p. 180-193 ; autre tr. fr. in Einstein, [1989-1991], vol. 5, *Science, éthique, philosophie*, Seuil, Paris, 1993, p.235-241.
- [1989-1991]. *Oeuvres choisies*, Seuil, Paris, 5 vols., 1989-1991.
- KANT, Immanuel [1786]. *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1796). Trad. fr. par François de Gandt, *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, in Kant, Emmanuel, *Oeuvres philosophiques*, vol. 2, Gallimard, Paris, 1985, p. 347-493.
- [1787]. *Kritik der reinen Vernunft*, J.F. Hartknoch, Riga, 1781; 2 è ed., 1787. Trad. fr. par Alexandre J.L. Delamarre et François Marty, *Critique de la raison pure*, in Kant, Emmanuel, *Oeuvres philosophiques*, vol. 1, Gallimard, Paris, 1980, p. 705-1470.
- LOCKE, John [1690]. *An Essay concerning human understanding*, London, 1690; 2nd ed, augm., 1694.
- LORENTZ, Hendryk Antoon [1895]. *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Brill, Leiden, 1895.
- [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.

MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik*. Trad. fr. par E. Bertrand, *La mécanique*, Paris, Hermann, 1904.

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

NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1687 ; 2ème éd., 1713 ; 3ème éd., 1726. Editée avec des variantes par A. Koyré et I.B. Cohen, Cambridge. Trad angl.(d'après la 3è éd.) par Andrew Motte (1729), *Mathematical principles of natural philosophy*, rév. et éditée par Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, 1934, ré-impr., 1962, 2 vols. (édition utilisée).

PATY, Michel [1992]. L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, in Dilworth, Craig (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, 1992, p. 73-110.

- [1993]. *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

- [1994a]. Mesure, expérience et objet théorique en physique, in Beaune, Jean-Claude (dir.), *La mesure, instruments et philosophies*, Champ Vallon, Seyssel, 1994, p. 159-174.

- [1994b]. 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.

- [à paraître]. L'invention du temps instantané chez Newton.

POINCARÉ, Henri [1898]. La mesure du temps, *Revue de Métaphysique et de Morale*, 6, 1898, 1-13 ; repris dans [1905a].

[1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902.

- [1905a]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905.

- [1905b]. Sur la dynamique de l'électron, *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo* 21, 1906, 129-176. Republié dans Poincaré, *Oeuvres*, Gauthier-Villars, 11 vols., Paris, 1950-1965, vol. 9, p. 494-550.