HAL
open science

Sur l'histoire du problème du temps.Le temps physique et les phénomènes

Michel Paty

To cite this version:

Michel Paty. Sur l'histoire du problème du temps.Le temps physique et les phénomènes. Le temps et sa flèche, Dec 1993, Paris, France. p. 21-58. halshs-00177358

HAL Id: halshs-00177358

https://shs.hal.science/halshs-00177358

Submitted on 7 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

in Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994, p. 21-58 ; 2è éd., 1995 ; Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.

Sur l'histoire du problème du temps. Le temps physique et les phénomènes *

par

Michel PATY **

SOMMAIRE

Introduction
L'idée de temps, le temps de l'histoire et le temps physique
Géométrisation du temps et construction du temps instantané
De l'assimilation du temps différentiel à la critique du temps absolu
Le temps dans la dépendance des lois générales des phénomènes et l'espace-temps de la Relativité restreinte
Le temps et la dynamique des phénomènes: l'espace-temps matériel de la Relativité générale et l'échelle physique du temps de la cosmologie
Remarques sur le temps en thermodynamique, sur la flèche et sur le cours du temps
Références bibliographiques

---

* Conférence à la Journée *Le temps et sa flèche.* Société Française de Physique, division "Champs et particules", Colloques sur les questions fondamentales de la physique. Sous le patronage du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, de *Libération*, *La Recherche*, *Ciel et espace*, 8.12.1993.

** Directeur de recherche au CNRS. Auteur, en particulier, de *La matière dérobée* (Archives contemporaines, Paris, 1988), *L'analyse critique des sciences* (L'Harmattan, Paris, 1990), *Einstein philosophe* (Presses Universitaires de France, Paris, 1993). Adresse professionnelle: Equipe REHSEIS (UPR 318, CNRS) et Formation doctorale en Epistémologie et Histoire des Sciences, Université Paris-7-Denis-Diderot- 2, Place Jussieu - F-75251 PARIS -Cedex-05, FRANCE.

INTRODUCTION

Je voudrais m'interroger avant tout sur la nature du concept de temps en physique, c'est-à-dire le temps tel que la physique le décrit, suivant le cours de l'évolution de ses théories. Je ne remonterai pas au-delà des débuts de la mécanique classique, car ce serait vraiment une tâche trop grande que de parcourir, même à grands traits, toute l'"histoire du temps", suivant le titre qui m'avait été initialement proposé. Bien que cette expression, en elle-même, soit intéressante et stimulante - elle intrigue -, elle n'est pas sans risque, comme des entreprises récentes l'ont montré. L'ambition de proposer une "histoire du temps", même "brève", a pu faire confondre ce qui ne pourrait être, en vérité, qu'une histoire des représentations du temps, avec la description "naturelle" des caractères d'un temps de l'univers, et des états de l'univers au cours du temps, c'est-à-dire avec l'objet de la cosmologie[1]. Quant à vouloir brosser une histoire des représentations du temps, ce serait un projet encyclopédique qu'une intelligence même boulimique - fût-elle conseillère des princes - ne parviendrait pas à accomplir seule[2]. Aussi bien me limiterai-je à l'évolution du concept de temps dans la physique "moderne et contemporaine", comme on dit de l'histoire, et même en ne considérant qu'un seul thème, qui se laisse résumer sous le titre "le temps et les phénomènes".

L'idée essentielle de cet exposé est la suivante: par-delà la notion commune de temps qui résulte de l'expérience quotidienne - et dont le contenu d'ailleurs diffère suivant les époques et les civilisations -, la physique a élaboré un concept de temps pensé au début comme étant le cadre "naturel" (avec l'espace) dans lequel les phénomènes se produisent, mais qui est en réalité construit, en fonction des nécessité de la physique (pour l'expression des lois du mouvement), et c'est le temps instantané et différentiel de la mécanique et de la physique classiques. Plus tard, ces nécessités amèneront, avec la théorie de la relativité, la cosmologie et la thermodynamique, à une sorte de renversement de point de vue, en faisant voir que le temps et l'espace ne sont pas le contenant ou la forme des phénomènes, indépendamment de ces derniers et condition de leur représentation, mais que ce sont au contraire les phénomènes physiques qui les définissent et les déterminent.

---

[1] Hawking [1988].
[2] Attali [1982].

L'IDEE DE TEMPS,
LE TEMPS DE L'HISTOIRE ET LE TEMPS PHYSIQUE

L'expression "histoire du temps", employée pour faire court à la place de "histoire de la notion (ou du concept) de temps", invite à penser l'expression réciproque, qui serait "le temps de l'histoire", ou "le temps comme histoire". Ce n'est pas là un jeu de mot : la notion de temps a partie étroitement liée à l'histoire, du moins entendue dans le sens du cours des événements humains, même avant l'écriture - et sans doute l'histoire qui nait avec l'écriture lui conféra-t-elle un sens assez proche de celui de l'acception courante, en relation à l'expérience des hommes et des sociétés, qui perdure jusqu'à nous.

L'astronomie elle-même, à laquelle les premières conceptualisations du temps sont généralement associées, était aux débuts - et resta longtemps - liée à l'histoire, dans la geste des civilisations[3] : elle présidait à l'histoire des dynasties comme à celle des destinées individuelles. Jusqu'à Képler[4], les positions des objets célestes restent des événements uniques et particuliers, datés et historiques, en relation à une conception ontologique et aristotélicienne de la causalité. En ce sens, les observations improbables, à quelques années de distance, de supernovae par Tycho Brahe[5] et par Képler reçoivent une signification toute spéciale… qui ne devait être retrouvée qu'au vingtième siècle, quand on réalisa, avec l'astrophysique contemporaine, que chaque corps céleste est caractérisé par une évolution propre qui constitue un processus singulier. (La rationalisation newtonienne prévalante entretemps ne porta son attention que sur les objets aux mouvements réguliers, et que l'on sut d'ailleurs relativement voisins, du Système solaire, pensés comme permanents, voire éternels, à l'instar des points matériels supposés les constituer.) L'équivalence ontologique - post-copernicienne - des corps célestes et sublunaires, la connaissance des trois lois du mouvement des planètes telles que Képler les énonça, la théorie de la gravitation de Newton[6], qui exprime des lois locales et différentielles et non plus seulement globales comme les lois de Képler ou comme la loi de Galilée[7] de la chute des corps sur lesquelles elle se base, en rattachant les mouvements des corps célestes à des lois générales, universelles et prévisibles, toutes ces circonstances firent se rompre le lien mystérieux supposé entre le ciel aux signes inscrits et l'histoire des destinées humaines.

---

[3] Sur l'astronomie dans les civilisations anciennes, on consultera avec profit les premiers chapitres de Andrillat [1993].

[4] Johannes Képler (1571-1630).

[5] Tycho Brahe (1546-1601).

[6] Isaac Newton (1642-1727).

[7] Galileo Galilei (1564-1642).

Les comètes gardèrent encore, à vrai dire, leur puissance évocatrice jusqu'au dix-huitième siècle, comme en témoigne le retour, en 1759, de celle de Halley[8], prédit à un mois près par les calculs de Clairaut[9] selon sa théorie des interactions de systèmes de trois corps, dans le cadre du système de Newton, en tenant compte des influences sur la trajectoire de Jupiter et de Saturne. La fascination qui accompagna dans le public la constatation de ce retour annoncé avec une précision extraordinaire pour l'époque tenait autant, assurément, à la persistance d'une croyance mythique qu'à la révélation du pouvoir inégalé de la nouvelle pensée théorique. Quoiqu'il en soit, l'exacte prédiction qui garantissait la soumission des comètes au calcul les dépouilla de leur aura de mystère et marqua l'effacement définitif de la superstition liée à leur apparition[10].

A partir de Newton, la trajectoire représentée sous la forme condensée de l'équation différentielle est comme un "temps embouti"[11] dans une immédiateté d'instant. Le temps construit et mathématisé par les fluxions et les différentielles efface l'histoire singulière du vécu - fût-ce un vécu-observé -, attachée à chaque instant, à chaque élément de durée, cette "épaisseur du temps vécu" dont parle Whitehead[12]. La physique - en premier, la mécanique - se constitue en échappant à l'histoire : la mémoire des événements qui ont eu lieu s'abolit dans la relation instantanée qui lie l'état du mouvement à un instant donné à celui pour l'instant immédiatement suivant, et qui fait de chaque instant passé ou à venir - aussi bien que présent - une entité abstraite. Le cours du temps se reconstruit ensuite à l'aide de l'équation différentielle et des conditions initiales données ou supposées, mais c'est un temps neutre, sans qualité, sans "odeur", sans accident, sans vécu circonstancié ou subjectif, que signale l'équivalence de tous les instants du temps, comme de tous les points des trajectoires. Ce caractère semble bien acquis par la mathématisation du temps, du temps pensé d'abord - par Newton - comme "mathématique", tout en étant le temps du monde physique. (Plus tard, le temps physique mathématisé gardera ce caractère d'être homogène, auquel la théorie mathématique des symétries associera une propriété d'invariance physique fondamentale, la conservation de l'énergie)[13].

Le temps abstrait fonctionne dès lors comme un cadre absolu pour les événements, "absolu et mathématique" (entendons: 'd'expression mathématique'),

---

8 Edmund Halley (1656-1742).

9 Alexis Claude Clairaut (1713-1765).

10 La même comète de Halley figure au Moyen-âge sur la tapisserie de la reine Mathilde, conservée à Bayeux, qui rappelle son apparition dans le ciel à l'époque de la bataille de Hastings. On sait que l'apparition des comètes était traditionnellement liée, dans l'imaginaire collectif, aux grandes catastrophes, aux épidémies de peste, etc.

11 J'emprunte cette expression très suggestive à Michel Debrun, voir Debrun [1993].

12 Le philosophe Alfred North Whitehead (1861-1947) estimait qu'une durée a une "épaisseur temporelle" et "retient en elle le passage de la nature": Whitehead [1919].

13 C'est l'un des aspects du théorème de Noether, qui établit aussi que l'homogénéité de l'espace entraîne la conservation de la quantité de mouvement, et l'isotropie de l'espace la conservation du moment angulaire (Emmy Noether, 1882-1935).

bien que physique, sans influence sur lui des objets et des phénomènes qui s'inscrivent dans son cours. Les objets et les événements sont pensés "dans le temps". La mécanique au dix-huitième siècle, puis, au long du dix-neuvième, les autres branches de la physique, se constituent ainsi, en se théorisant à l'aide de l'analyse, en dehors de toute ontologie du temps et de l'histoire. Ce trait de notre connaissance des phénomènes de la nature semblait inexorable, jusqu'à ce que - scandale ! -, la physique contemporaine en vienne à retrouver, sinon l'histoire, du moins une certaine 'consistance' du temps. Celle-ci se marque dans la nature même des phénomènes qu'elle étudie, selon trois modes différents: celui du cours du temps, lié à la causalité et à la propagation à vitesse finie des interactions, celui du temps irréversible de la thermodynamique, enfin et surtout celui du temps de l'Univers et de la flèche cosmologique. Ce dernier, en effet, paraît bien réintroduire, dans notre conception du temps physique, quelque chose de celui de l'histoire - non celle de l'humanité, bien entendu, mais celle de l'Univers. Nous y reviendrons en conclusion.

L'"histoire du temps" que je me propose de vous conter - ou, plus exactement, d'évoquer -, en vue d'en tirer une indication fondamentale sur sa nature, se limite à la constitution du concept de temps par la physique en dehors de l'histoire. Elle commence avec les premiers essais de géométrisation du temps, au quatorzième siècle.

GEOMETRISATION DU TEMPS ET CONSTRUCTION DU TEMPS INSTANTANE

Tout en définissant le temps comme un "nombre", mesurant l'avant, le pendant et l'après, Aristote[14] le considérait comme une qualité : il fallut attendre le quatorzième siècle pour le voir passer de la qualité à la quantité, en même temps qu'il se géométrisait, comme paramètre du mouvement. L'impulsion semble dès lors donnée dans la direction d'une emprise progressive de la pensée rationnelle sur le concept de temps, en vue d'en élucider la signification, comme pour opposer une approche positive aux doutes de Saint Augustin, qui disait à peu près, à propos du temps: "si l'on ne me demande pas ce qu'il est, je le vois clairement, mais si l'on m'interroge, je ne sais plus"[15].

Robert Grosseteste[16] et les philosophes de la nature d'Oxford estimaient que la succession des instants dans son rapport à la durée pose le même

---

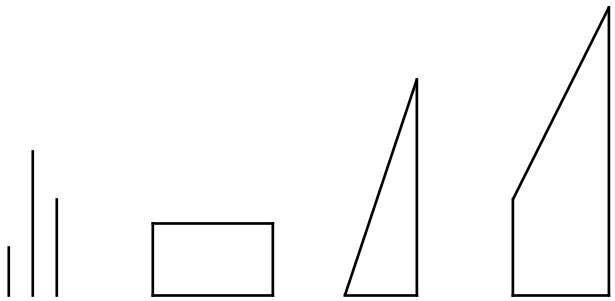
[14] Aristote (384-322 avant J.C.).

[15] Saint Augustin (Aurelius Augustinus, 354-430). Voir les *Confessions*, XI, 14.

[16] Robert Grosseteste (1170-1253). Cf. Crombie [1952].

problème que, dans son rapport à une longueur, la suite continue et infinie des points sans extension, dont ils considéraient qu'une ligne est constituée. Grosseteste émettait aussi l'idée qu'il n'existe pas de mesure primaire et naturelle des longueurs, et qu'il revient à l'homme d'introduire une unité, par une décision ou opération de notre part, par un choix (que nous dirions de convention). De fait, les heures, les jours et les mois divisaient l'année en fonction de l'expérience humaine des saisons et des travaux, et les clepsydres et les horloges à pendules fournissaient les valeurs du temps mesuré dans ces unités. Newton évoquera, pour sa part, dans les *Principia* (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*), le caractère arbitraire au regard de la nature, et d'ailleurs relativement imprécis, des déterminations humaines du temps. Il les verra cependant corrigées par l'équation astronomique, ce qui les rapproche à ses yeux du temps réel et absolu)[17].

Les maîtres des écoles de Paris et d'Oxford étudiaient le mouvement en considérant l'accroissement et la décroissance des quantités (ou grandeurs) cinématiques, et faisaient l'hypothèse que le mouvement uniformément varié est équivalent à un mouvement uniforme dont la vitesse est la vitesse moyenne du mouvement varié : telle est la "règle de Merton"[18]. Elle fut démontrée géométriquement par Jean Buridan[19] et par son disciple Nicole Oresme[20], à l'aide d'une représentation des différents moments du temps en succession par les points (abscisses) d'une ligne droite horizontale, dénommée "longitude", la vitesse correspondante d'un mouvement donné étant portée sur la verticale en ce point (et désignée par le terme de "latitude" : terminologie évidemment empruntée à l'astronomie). La somme des latitudes, selon Oresme, était la distance parcourue; le mouvement uniforme était donc représenté par des rectangles, les mouvements uniformément variés par des triangles ou des trapèzes.



REPRESENTATION DU TEMPS (ABSCISSES, OU 'LONGITUDES') ET DES VITESSES (ORDONNEES OU 'LATITUDES') SELON ORESME.

---

17 Newton, Préface de 1887 aux *Principia*, Newton [1887].

18 Elle tient son nom du Merton College à Oxford.

19 Jean Buridan (1300-1358) enseigna à l'Université de Paris.

20 Nicole Oresme (1325-1382), d'origine allemande, enseigna aux Universités de Navarre et de Paris.

Cette description de la variation d'intensité de la "qualité de mouvement" (c'est-à-dire la vitesse) est une véritable paramétrisation géométrique du mouvement en fonction du temps : elle constitue un premier essai de géométrisation du temps et revient, sinon à substituer à la qualité aristotélicienne une quantité, du moins à exprimer la qualité par une quantité. Le temps est quantifié en tant qu'il est le paramètre de la variation des grandeurs et des phénomènes : mesure de la durée des choses dans leur être, il est à la fois ontologique et mathématique.

Les idées de temps et d'espace, telles qu'elles sont utilisées en mécanique, avant même Newton, sont en fait reliées à une pensée des objets physiques et de leurs mouvements. S'intéressant aux trajectoires des corps en mouvement, Léonard de Vinci[21] établit que la trajectoire d'un corps lancé à l'oblique est une courbe continue[22], et étudie la variation avec l'angle d'inclinaison des temps de chutes d'un corps sur un plan incliné[23]. Quant à Galilée[24], émettant l'idée, décisive, que "le livre de la nature est écrit dans la langue mathématique", il donne la loi du mouvement uniforme (principe d'inertie)[25] ainsi que celle de la chute des corps et des mouvement uniformément accélérés[26] : il établit par l'expérience et par le raisonnement la loi qui exprime les hauteurs de chutes et les espaces parcourus en fonction des intervalles de temps finis considérés et des vitesses moyennes[27].

D'Aristote à Descartes en passant par les philosophes d'Oxford et de Paris, le temps est conçu par la mesure des durées perçues. Si Galilée et Descartes le prennent comme paramètre dans l'étude du mouvement, c'est toujours comme le seul temps sensible et relatif, dont la connaissance est directement liée à celle des corps. Pour Descartes[28], l'on se fait de la durée d'une chose une idée claire et distincte à condition d'oublier en elle la qualité, "l'idée de la substance", et de n'y voir qu'"un mode ou une façon dont nous considérons cette chose en tant qu'elle continue d'être". Mais avec Barrow et Newton, il est question de dissocier la durée comme persévérance dans l'être et ses mesures sensibles, imparfaites et (déjà pour

---

21 Léonard de Vinci (1452-1519).

22 Et non un ensemble de deux segments de droites raccordés par un arc de cercle comme les spécialistes de balistique le croyaient communément. Niccolo Tartaglia (1499-1557) le montrera également, en 1546.

23 Il trouva qu'elle est en raison inverse du sinus de l'angle d'inclinaison.

24 Cf. Galilei [1638], Koyré [1939], Geymonat [1957], Clavelin [1968], Drake [1970].

25 La formulation de Galilée est encore tributaire de l'idée aristotélicienne que la pesanteur est une qualité des corps. Le principe d'inertie fut ensuite exprimé de manière plus générale par Descartes, puis par Newton.

26 Le principe d'inertie et la loi de composition des mouvements entraînent le principe de relativité, dont il faudrait retracer ici l'histoire, pour la mécanique, de Galilée à Gassendi et à Huygens, qui le formule explicitement. Sur ce dernier point, voir Vilain [1993].

27 Les espaces parcourus sont comme les carrés des temps, etc.

28 René Descartes (1596-1650).

l'école d'Oxford) déterminées par nous. Et, de fait, la mécanique newtonienne nous fait voir le temps, devenu objet de mesure et mathématisé, sous deux espèces distinctes : le temps relatif (celui de la durée sensible et de la mesure) et le temps absolu (celui de la persévérance dans l'être, "vrai et mathématique", selon une conception imprégnée du néo-platonisme de l'école de Cambridge). C'est à ce dernier que sont rapportées les lois du mouvement.

On trouve chez Isaac Barrow[29], qui exerça une certaine influence sur Newton, l'idée que le temps, considéré de manière abstraite, étant la persévérance d'une chose, quelle qu'elle soit, dans son être, dans son état, et dans son mouvement, il ne peut être ou plus long, ou plus court, et doit donc être absolu. Plus profondément encore, certaines réflexions de Barrow sur l'instant et la durée et sur la difficulté de les concevoir ensemble, annoncent, d'une certaine façon, la résolution qu'en donnera Newton[30]. Il considère, dans ses *Leçons de géométrie*, le flux du temps en analogie à la continuité d'une ligne droite engendrée à partir de points, et laisse entendre que l'on peut concevoir des instants, ou "moments" du temps, bien que ce dernier soit pensé fondamentalement comme une durée en flux continu - conception que l'on trouve également chez Newton.-, de même que l'on se représente des points sur une droite. Le temps instantané, dont la définition se cherche ici, pose les mêmes problèmes que la nature du point et la divisibilité de la ligne et de l'espace, objet depuis Zénon d'Elée de controverses classiques. On voit, en tout cas, à la manière dont Barrow formule sa conception du temps, de la durée à l'instant, comment ce qui manque encore à la mécanique (la conceptualisation d'un instant de temps) est exactement connaturel à ces grandeurs infinitésimales de la géométrie dont l'approche est encore tâtonnante, des indivisibles de Cavalieri[31] aux maxima et minima de Fermat.

C'est à Isaac Newton[32] que devait revenir la construction du temps instantané à partir du temps conçu comme durée, en corrélation à l'invention du nouveau calcul, créé en grande partie pour les besoins de la cause, bien que les *Principia* ne fassent pratiquement pas explicitement appel à sa théorie ou méthode des fluxions. Je n'entrerai pas ici dans le détail de ces questions[33], pour m'en tenir à l'essentiel de ce qui nous occupe ici : la nature du concept de temps qui est en jeu dans la mécanique de Newton. On en a retenu surtout la définition du temps absolu, et le fait que, comme l'espace, le temps newtonien constitue le cadre des événements, indépendant d'eux. Mais on n'a pas assez pris garde que le temps newtonien n'est pas tant donné que construit, même s'il n'est pas présenté comme

---

29 Isaac Barrow (1634-1677).

30 Il semble que l'on ne doive pas, par contre, chercher chez Barrow la préfiguration du calcul infinitésimal, dont les véritables ancêtres, avant Newton et Leibniz, sont Pierre de Fermat (1601-1665], Blaise Pascal (1623-1662), John Wallis (1616-1703), Christiaan Huygens (1629-1695)… Cf. p. ex., Itard [1984].

31 Bonaventura Cavalieri (1598-1647).

32 Isaac Newton (1642-1727). Cf. Newton [1787] et [1967-1981] Sur Newton, cf., p. ex. Koyré [1968].

33 Voir Paty [1994] et [à paraître].

tel, et que la spécification du "temps absolu, vrai et mathématique" a, en réalité, surtout pour rôle de préparer la condition d'une reformulation plus radicale du concept de temps, sous les espèces d'une grandeur mathématisée, singulière et à variation continue, c'est-à-dire différentielle. La pleine conscience de la nature et de la signification de cette construction ne devait être acquise que progressivement, avec l'assimilation, en mécanique et en physique, du contenu effectif de cette grandeur et de son caractère opératoire. Elle ne serait achevée que lorsque le temps et sa différentielle seraient conçus indépendamment de traductions géométriques, c'est-à-dire avec la *Mécanique analytique* de Lagrange[34].

Newton propose sa conception du temps dans le *scholie* (commentaire) du Livre I des *Principia* qui suit les définitions des grandeurs moins courantes constitutives de sa mécanique (quantité de mouvement, force, etc.). Il s'agit à ses yeux, plutôt que d'une définition, d'une explication ou clarification concernant une grandeur existant par elle-même, antérieure à toutes nos élaborations. "Bien que le temps, l'espace, le lieu et le mouvement soient très connus de tous", écrit-il, "on ne les conçoit communément qu'en relation à des choses sensibles", ce qui entraîne des confusions. Pour éviter ces dernières, "il convient de distinguer ces quantités en absolues et relatives, vraies et apparentes, mathématiques et vulgaires".

C'est ainsi qu'il caractérise le temps de la manière que l'on connaît: "Le temps absolu, vrai et mathématique, qui est sans relation à quoi que ce soit d'extérieur, en lui-même et de par sa nature, coule uniformément ; on l'appelle aussi ‘durée’". Remarquons que c'est la *durée* qui définit d'abord le temps, c'est-à-dire son flux continuel, et non les instants, qui ne sont pas mentionnés. (De fait, ils seront constitués, mathématiquement, à partir de la durée et du mouvement). Le "temps relatif, apparent et vulgaire", est celui dont nous avons connaissance à partir des impressions sensibles et des mesures, par exemple astronomiques. Il faut alors corriger, par l'"équation astronomique", cette durée mesurée pour connaître le temps absolu, caractérisé selon sa définition naturelle par une régularité du cours du temps que peut-être aucun mouvement effectif ne possède.

Notons que le temps (la durée) ainsi obtenu, qui s'identifie au "temps vrai", est déterminé par une *loi* (l'équation astronomique), qui porte sur les mouvements célestes: c'est, en retour, par cet intermédiaire que pourront être déterminés les phénomènes et les lois temporelles qui les régissent, aussi bien le mouvements des horloges à pendules[35] que les éclipses des satellites de Jupiter[36]. On mesure ce que le temps ainsi conçu a de construit: sa connaissance suppose celle d'une régularité des lois astronomiques (que Newton rapporte, pour sa part, à la vérité mathématique du monde).

La relation du temps absolu telle que Newton la conçoit a lieu dans un seul sens : le temps détermine les phénomènes, non l'inverse, car il existe par lui-même, et son ordre est immuable. Par ailleurs, sa conceptualisation d'un temps et

---

34 Joseph Louis Lagrange (1736-1813). Cf. Lagrange [1788].

35 L'isochronisme des oscillations du pendule a été étudié de Galilée à Huygens.

36 Newton mentionne expressément ces phénomènes dans son scholie.

d'un espace supposés naturels est, en vérité, une construction. Le statut absolu de l'espace et du temps est lié à leur caractère mathématique, qui en fait aussi des grandeurs continues. Mais il y a, chez Newton, quelque chose de plus, qui rattache directement les concepts d'espace et de temps, tels qu'ils sont mathématisés dans sa mécanique, aux lois fondamentales du mouvement des corps. Le point matériel en mouvement et le temps instantané sont construits, en même temps que le langage mathématique qui les exprime, en fonction de cette loi - qu'il s'agit d'établir - du mouvement des corps que nous appelons aujourd'hui loi de causalité.

Ce qui assure, en fait, en le rendant effectif, le caractère physique du temps et de l'espace, c'est leur inscription dans l'équation du mouvement. Tout en étant pris dans le corset de leur définition générale, ces concepts sont constitués de manière plus précise en vue de leur mise en oeuvre pour l'obtention des lois du mouvement, c'est-à-dire d'un certain type de phénomènes. En d'autres termes, ils sont constitués en fonction, sinon des phénomènes, du moins d'une vue sur les phénomènes. C'est de cette manière que l'on voit, dans la théorie du mouvement des corps exposée par Newton dans ses *Principia*, se construire mathématiquement le temps instantané pour exprimer la loi qui relie entre elles les grandeurs caractéristiques du mouvement en un point et en un temps donnés. Le temps "absolu, vrai et mathématique" de la mécanique newtonienne est donc en réalité constitué par la pensée du calcul différentiel, pour assurer la formulation mathématique des lois fondamentales du mouvement.

L'introduction, dans les *Principia*, de cette nouveauté conceptuelle fondamentale pour la physique, le temps instantané, qui fixe les relations de causalité, n'est nulle part explicite, et c'est d'abord rétrospectivement qu'elle apparaît liée au calcul différentiel. Mais elle est indéniablement contenue dans les *Principia*, dans la manière opératoire qui conduit aux résultats, bien que celle-ci soit d'apparence purement géométrique, sans utilisation directe des fluxions[37].

La conception du temps instantané et différentiel est présente, sans la terminologie et sans la symbolisation, dans la formulation géométrique particulière par laquelle Newton présente ses raisonnements, et qui correspond en fait aux concepts de ce calcul. Les considérations sur les "premières et dernières raisons" qui ouvrent le livre I, "Le mouvement des corps", sont assez semblables à celles de ses recherches mathématiques sur les fluxions. La "méthode des premières et dernières raisons des grandeurs" fait intervenir l'idée de convergence continue de quantités qui sont aussi bien des grandeurs géométriques que des rapports de ces grandeurs, et de limite à l'infini de ces rapports (ou dernières raisons), qui permet de substituer l'un à l'autre les segments de ligne tels que l'arc, la corde ou la tangente, figurant dans les rapports. Comme le verront justement aussi bien un d'Alembert qu'un Lagrange, la méthode des infiniments petits, des limites ou des

---

[37] Du moins en règle générale, car les fluxions sont invoquées en quelques endroits (dans le deuxième livre, sur "Le mouvement des corps dans des milieux résistants", appelées par la formulation des problèmes, où la résistance des milieux est exprimée selon des fonctions diverses de la vitesse.)

fluxions n'est pas autre chose que la méthode des "dernières raisons des quantités évanouissantes", dont elle est la traduction algébrique[38].

La manière dont Newton tente d'éclairer ce qu'il entend par ses "raisons [ou rapports] de grandeurs évanescentes", très voisine de celle qu'il emploie par ailleurs quand il définit les fluentes et les fluxions dans ses textes sur ces dernières, présente en outre l'intérêt extrême de nous mettre sur la voie de son innovation fondamentale. "Par dernière raison [ultimate ratio] de grandeurs évanescentes", écrit-il, "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"[39]. L'expression employée permet de situer exactement l'apparition, *par construction*, du temps instantané et de son rôle - sans le terme, ni aucun symbole - : elle désigne, en effet, en même temps que la limite, le temps instantané qui la fixe, comme moment de l'évanouissement, l'instant sans extension où ces rapports relatifs au mouvement ont la valeur considérée. Le calcul des fluxions est de fait conceptuellement présent - sans le symbolisme - dans cet établissement des lois des mouvements des corps pour un instant donné.qui se présente sous les dehors de raisonnements géométriques. L'emploi des quantités finies que sont les limites de rapports est 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.

C'est ainsi que, avec l'élaboration de cette 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 I, à savoir l'explication (mathématique) des phénomènes : la causalité dans le sens différentiel, relative au rapport entre les états de mouvement d'un corps à deux instants successifs[40].

Il ne m'est pas possible de m'étendre ici sur les raisons pour lesquelles on ne trouve pas, dans les *Principia*, les équations du mouvement écrites algébriquement, en termes de fluxions, Newton n'ayant d'ailleurs très probablement pas eu recours, dans la grande majorité de ses démonstrations, à ce calcul, dont il n'avait pas maîtrisé toute la puissance, et d'ailleurs d'application difficile (le calcul des fluxions est de maniement bien plus lourd que le calcul différentiel)[41]. Par ailleurs, sa conception des rapports entre la synthèse géométrique et l'analyse algébrique suffit sans doute à rendre compte du privilège donné au mode géométrique de démonstration choisi pour les *Principia*. Mais c'est une géométrie "dynamique", imprégnée par son concept de limite qui porte le temps instantané : cela suffit - par les résultats acquis - à en faire l'extrême nouveauté.

---

38 D'Alembert [1743], ed. 1758, p. 50. Voir aussi ses articles "Différentiel" et "Fluxions" de l'*Enclopédie*. Lagrange [1797].

39 Newton [1687], *ibid.*, p. 39 (souligné par moi, M.P.).

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

41 Voir Paty [1994].

Nouveauté qui comporte ses difficultés conceptuelles propres : dans les *Principia* comme dans le *Traité des fluxions*, Newton ne fait pas de différence entre les "moments" des grandeurs fluentes, c'est-à-dire leur accroissement ou diminution absolue (ce que nous désignons par la différentielle, dA, suivant la notation leibnizienne) et les vitesses de ces changements, c'est-à-dire $\frac{dA}{dt}$, précisément parce qu'il ne dispose pas d'une conceptualisation réelle de la différentielle de ce temps instantané (dt): souvenons-nous, que, pour lui, le temps vrai est durée, flux continu.

Nous concluerons donc que le temps newtonien est la condition de la mathématisation de la mécanique: celle-ci n'a été rendue possible que par la création d'une grandeur temps adéquate au problème de la loi du mouvement des corps et, de même, d'une grandeur espace : la théorie du mouvement des corps de Newton a pour notions élémentaires celles de point matériel et de temps instantané, qui ne seront vraiment maîtrisées qu'avec les concepts du calcul différentiel et intégral. Le temps et l'espace, qui sont liés dans cette conceptualisation du mouvement et dans cette construction de sa loi, demeurent complètement séparés l'un de l'autre. Ils restent aussi indépendants des phénomènes, dont ils constituent le cadre, comme nous l'avons vu. Quoiqu'impensables sans les corps, ils ne sont pas affectés par eux, comme le diagnostiquera d'Alembert[42]. Poussant, après Locke, la dissociation entre le cadre et les objets et phénomènes qui s'y déroulent, Kant y verra les formes *a priori* de la sensibilité qui conditionnent la possibilité de la connaissance de ces derniers[43].

Par ailleurs, il fallut un certain temps avant que le nouveau calcul mathématique ne soit appliqué de manière effective et systématique à la mécanique, et que les concepts physiques qu'il permettait d'exprimer soient complètement maîtrisés - et explicités : le temps au moins de l'assimilation, c'est-à-dire de la création des conditions intellectuelles et des habitudes mentales nécessaires. L'évidence ultérieure fait oublier les difficultés et les tâtonnements initiaux, qui témoignent pourtant combien cela n'était pas acquis au départ. En particulier, la représentation géométrique des grandeurs de la mécanique, encore présente comme support de l'intuition chez un Euler ou chez un d'Alembert, s'accompagnait d'une imprécison sur le contenu exact des notions fondamentales telles que l'instant, conduisant d'ailleurs à certaines difficultés ou ambiguïtés. Ce n'est, en réalité, qu'avec la représentation totalement analytique, c'est-à-dire algébrique, de la *Mécanique analytique* de Lagrange, sans l'appui de figures, que l'adéquation complète de la représentation des grandeurs fondamentales à leur contenu physique et opératoire - pour le temps instantané, les t et dt du calcul différentiel - est obtenu : nous pensons, depuis lors, en physique, le temps instantané de cette seule manière.

La physique se constitue ensuite théoriquement dans ses diverses branches à partir de la conceptualisation différentielle de l'espace et du temps, liée

---

42 D'Alembert [1758, 1768].

43 Kant [1786] et [1787].

par naissance aux problèmes et aux grandeurs de la mécanique. C'est d'ailleurs pourquoi les notions fondamentales que sont l'espace et le temps se trouveront au centre des questions posées à la mécanique à partir des développements de la physique, surtout à la fin du dix-neuvième siècle et au début du vingtième, aboutissant à la remise en chantier qu'en propose la théorie de la relativité.

LE TEMPS DANS LA DEPENDANCE DES LOIS GENERALES DES PHENOMENES ET L'ESPACE-TEMPS DE LA RELATIVITE RESTREINTE

La théorie de la relativité restreinte représente une nouvelle étape de la conceptualisation du temps, dont nous considèrerons deux aspects importants. Le premier touche aux circonstances de la reformulation, et à la nécessité de cette dernière par-delà toute contingence telle que le cheminement particulier de la pensée d'un chercheur : les éléments objectifs qui rendaient nécessaire une nouvelle conception du temps sont lisibles dans le travail de pensée qui parvient à l'établir (celui d'Einstein dans sa contribution de 1905 "Sur l'électrodynamique des corps en mouvement"[44]). Or ils correspondent à une soumission du temps, dans la mesure où il est physique, et en jonction avec l'espace, à certaines contraintes posées par les phénomènes, à savoir, les deux principes de relativité et de constance de la vitesse de la lumière, caractéristiques respectivement de l'ensemble des phénomènes de la mécanique et de l'électromagnétisme.

Le second aspect qui nous retiendra concerne les particularités du temps ainsi reformulé, qui comprennent la relativité de la simultanéité, la transformation du temps dans les référentiels en mouvement relatif, la dilatation du temps (et les 'paradoxes' du temps relativiste comme celui du voyageur de Langevin), le lien structurel du temps et de l'espace (la vitesse de la lumière acquérant désormais la signification de constante de structure de l'espace-temps), la représentation dans l'espace-temps du cône de lumière et la causalité relativiste.

Il est possible d'exprimer en quelques mots l'un des traits les plus frappants du temps relatif à l'espace ou encore du temps de l'espace-temps de la relativité restreinte : c'est, tout en gardant encore quelque chose d'un contenant (comme en mécanique newtonienne), mais à travers la relation de structure de l'espace-temps, d'être construit en dépendance des lois générales des phénomènes, et de n'être plus pensable comme simplement "mathématique" et existant en soi. C'est ce que l'analyse des deux aspects que nous avons retenus va nous montrer clairement.

On a souvent considéré la reformulation de l'espace et du temps des

---

[44] Albert Einstein (1879-1955). Cf. Einstein [1905].

théories de la relativité (restreinte et générale) - et surtout de la première - comme si cette réforme avait été pensée *ab initio* en examinant ces concepts en eux-mêmes : la critique de leur acception en mécanique et dans la physique classique aurait été motivée par une conception "positiviste" de la définition des grandeurs en physique, qui les soumet aux conditions de l'observation et de la mesure. Selon cette interprétation, l'espace et le temps einsteiniens seraient physiques parce qu'ils peuvent être mesurés. Au contraire, l'espace et le temps de la physique classique (rapportés à des grandeurs "absolues") serait idéal et non physique. 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.

Si nous examinons les conditions effectives, du point de vue historique, de l'élaboration de la théorie de la relativité (restreinte et générale), nous sommes amenés à constater que le temps et l'espace, et leur intégration structurale 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 (selon des modalités différentes pour les deux théories : nous y reviendrons). Ce qui se propose en premier, ce sont les phénomènes - et non la mesure - : le temps et l'espace en termes desquels nous représentons ces phénomènes sont construits de manière à permettre une représentation adéquate de ces derniers.

Dans l'élaboration par Einstein de la théorie de la relativité restreinte, 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 exerçée depuis longtemps, à savoir : la conciliation de l'électrodynamique de Maxwell et Lorentz[45] 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 pensait, 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), Einstein 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,

---

[45] James Clerk Maxwell (1831-1879), Hendrik-Antoon Lorentz [1853-1928).

dès lors que l'on considère 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 principes, admis comme vrais chacun pour sa théorie d'origine, apparaissaient incompatibles si on les considérait ensemble, et ceci bien que les phénomènes électromagnétiques respectent toujours la relativité des mouvement d'inertie (induction de Faraday pour un aimant 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 électromanétiques. 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 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 Poincaré[46]. 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 mentionnés.

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 (expression des lois de la mécanique, et des phénomènes optiques, 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 maanière détaillée sur cette construction où intervient la considération des significations physiques (c'est-à-dire des contenus, en termes de traits de phénomènes physiques)

---

[46] Ernst Mach (1838-1916), Henri Poincaré [1854-1912).

des grandeurs temps et espace, d'abord considérées pour un point et un instant donnés puis, dans un même référentiel, en 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 signification physique des coordonnées d'espace, des distances, est donnée en termes de corps rigides (qui constituent la base des conceptions de la géométrie euclidienne) et celle du temps et de la durée, en termes d'horloges ; 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 par rapport auquel ils sont portés. Plus généralement, les formules de transformation (de Lorentz) pour les coordonnées d'espace et le temps dans des référentiels en mouvement (inertial) 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, qui font apparaître des propriétés inédites comme la contraction des longueurs et la dilatation des durées. 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, le temps et l'espace 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 Poincaré[47]). Mais ce dernier 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 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 déroulent 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.

---

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

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 systèmes d'inertie et de la constance de la vitesse de la lumière). Ce trait constitue da 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 espace et temps absolus, ils étaient définis en eux-mêmes, sans référence aux corps, comme cadre supposé et nécessaire des phénomènes mécaniques[48].

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 euclidienne : 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 dimensions[49]) 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-temporelle.

Toutes ces considérations amènent naturellement à se poser la question de la nature et des limites de cette rupture. Cette question renvoie à l'étape précédente, de la construction du temps en physique classique, telle que nous l'avons évoquée, ainsi qu'à l'étape suivante, celle du temps selon la relativité générale, qui accentue considérablement la soumission du temps aux phénomènes, comme nous allons le voir.

---

48 Aux remarques près que nous avons faites précédemment sur la construction [mathématique] du temps instantané et du point matériel par le calcul différentiel.

49 Indiquons que c'est à Henri Poincaré que l'on doit la formalisation du temps comme quatrième coordonnée imaginaire : cf. Poincaré [1905], Paty [1993].

LE TEMPS ET LA DYNAMIQUE DES PHENOMENES: L'ESPACE-TEMPS MATERIEL DE LA RELATIVITE GENERALE ET L'ECHELLE PHYSIQUE DU TEMPS DE LA COSMOLOGIE

Abordons maintenant la construction de l'espace-temps de la Relativité générale et sa signification physique. Comme on le sait, la modification que 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, c'est-à-dire 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 : rien, 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 - et, également, comme la condition de la solution - d'un problème physique plus général : celui de la nature du champ de gravitation, posé dès 1907, deux ans après 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 ($m_I = m_G$)[50], 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 s'aperçoit plus 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

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

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 (elle 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.

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 Mach[51] (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 un 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

[51] Cf. Mach [1883].

solution fut occasionnée par la question, soulevée en termes de paradoxe par Ehrenfest[52], 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 l'observe 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. 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-Civitta[53], étaient immédiatement adaptés à l'expression de la covariance générale, c'est-à-dire à la résolution de son problème.

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 de 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 être 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

---

[52] Paul Ehrenfest (1880-1933).

[53] Tullio Levi-Civitta (1873-1941) ; Gregorio Ricci-Curbacastro (1853-1925).

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 mathématique. Le calcul différentiel absolu permettait de trouver les lois de transformation de 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, $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\chi T_{\mu\nu}$ [54] 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 générale. 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) 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.

On voit comment le temps physique ainsi construit à travers la théorie de la relativité générale est déterminé par les phénomènes (en l'occurence, 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 'contenu'.

Cet aboutissement d'une évolution de nos conceptions sur le temps, qui rend de plus en plus explicite son caractère construit en référence aux phénomènes du monde physique et la soumission de son 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 jeu[55]. (Et l'on ne sait plus, en deçà du temps de Planck[56], ce que le temps signifie physiquement, puisqu'on ignore tout

---

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

[55] Sur la cosmologie contemporaine, voir, en particulier, Merleau-Ponty [1965], Andrillat [1993], Audouze, Musset, Paty [1990].

[56] $t_P = 10^{-43}$ sec La distance correspondante est $d_P = 10^{-19}\, cm$, et l'énergie, ou "masse de Planck", $m_P = 10^{19}\, GeV$.

de la théorie qui correspond à ce domaine de dimensions spatiales extrèmement petites et d'énergies immenses, où la gravitation doit être quantifiée. A plus forte raison peut-on douter que la notion de "temps zéro" de l'Univers ait un sens. Le temps 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.)

REMARQUES SUR LE TEMPS EN THERMODYNAMIQUE, SUR LA FLECHE ET SUR LE COURS DU TEMPS

Nous n'avons pas abordé, dans ce qui précède, les problèmes reliés à la thermodynamique et à l'irréversibilité, ni d'ailleurs ceux qui se rattachent à la physique quantique, notre propos s'étant limité à montrer comment le temps en physique, dans les domaines où il était traditionnellement considéré comme un cadre donné avant les phénomènes, par rapport auquel ces derniers se définissent et se déterminent, est en réalité conditionné par la pensée de ces phénomènes. Ceci s'est effectué sous des formes différentes, au cours de l'évolution de la physique telle que nous l'avons suivie de la mécanique classique à la Relativité restreinte et générale, d'une pensée d'un temps universel et uniforme mais cependant formulé physiquement en fonction de la nécessité d'exprimer la loi des phénomènes (temps instantané et différentiel) à une pensée du temps structuré par les phénomènes physiques eux-mêmes.

Dans cette évolution, nous voyons le temps prendre une certaine consistance "matérielle", dont il semblait dépourvu avec la conception du temps absolu et mathématique de Newton. Le fait que ce soient les phénomènes qui gouvernent les propriétés du temps et non l'inverse amène donc à retrouver dans le temps physique une certaine épaisseur ou consistance - mais qui n'est quand même pas celle de l'histoire vécue dont nous parlions en commençant, sinon, et dans un certain sens, le temps de la cosmologie.

Cette consistance se marque d'une manière générale dans la nature même des phénomènes que la physique étudie, si l'on considère le temps comme une grandeur à une dimension[57], selon trois modes différents : celui du cours du temps, lié à la causalité et à la propagation à vitesse finie des interactions, celui du temps irréversible de la thermodynamique, enfin et peut-être surtout celui du temps de l'Univers et de la flèche cosmologique.

Le cours du temps, du passé vers le futur, avait été postulé au départ, par exemple quand Aristote définissait le temps comme "le nombre du mouvement

[57] Tout en étant lié à l'espace et à la matière, le temps garde sa spécificité en tant que grandeur.

en rapport à l'avant et à l'après". Mais l'uniformité du temps et la parfaite symétrie entre le passé et le futur supposées par la mécanique classique impliquaient la réversibilité des lois du mouvement : cet état de chose demeure d'ailleurs encore avec la Relativité générale. La réversibilité n'entraîne aucune conséquence sur le cours du temps, qui est conçu par définition du passé vers le futur. Toutefois, si les processus physiques sont réversibles, il est possible en principe de concevoir des séquences de processus inverses de celles ordinairement considérées, tout en étant due à une même loi de causalité : il suffit d'inverser les conditions initiales et finales. L'expérience vécue de tels phénomènes, si elle était possible, donnerait l'impression de remonter en arrière dans le temps (éprouvant l'expérience d'une séquence inverse des phénomènes).

Cette expérience est impossible, et on l'attribue en général à l'entremise de la thermodynamique et de l'irréversibilité qui en résulte : les phénomènes que l'on peut expérimenter sont toujours des phénomènes macroscopiques et font intervenir inévitablement l'irréversibilité de la physique statistique, résultant du rôle que jouent les distributions de probabilités.

La notion de "cours du temps" reste cependant distincte de celle d'irréversibilité. Il existe, en effet, dans la physique des processus réversibles, qui ne font pas intervenir la physique statistique et la thermodynamique, des phénomènes où le cours du temps semble se manifester de manière objective, au-delà du seul choix de sa définition. Les phénomènes électromagnétiques, tels que la théorie de Maxwell les représente et les explique, ne font connaître que des ondes retardées, et non des ondes avancées, qui seraient pourtant mathématiquement possibles, de même qu'en mécanique les trajectoires pourraient être remontées à contre-courant du temps pour une même équation. Les phénomènes semblent donc imposer ici comme naturel ce qui ne dépendait jusqu'alors que d'un choix de définition. Cette différence entre la mécanique et l'électromagnétisme, où le second impose d'un point de vue phénoménal ce que la première admettait seulement pour rester cohérente avec ses définitions, tient au facteur désormais essentiel que constitue la valeur finie de la vitesse de propagation des interactions électromagnétiques, celle de la lumière. La relativité restreinte le justifie par la structure de l'espace-temps et les propriétés du cône de lumière, rendant ainsi compte, par une conception plus précise de la causalité, du sens unique du cours du temps. La direction du cours du temps est immuable, mais la succession des phénomènes de la mécanique et de la relativité ainsi que, jusqu'à nouvel ordre, de la physique quantique[58], est réversible.

Quant à l'irréversibilité elle-même, qui est une irréversibilité de phénomènes (macroscopiques) - bien qu'elle soit généralement appelée "irréversibilité du temps" -, elle pose d'autres problèmes fondamentaux qu'il n'est pas possible d'aborder ici. Notons cependant que l'expression même est

[58] Il existe une violation de la symétrie temporelle dans certains processus d'interaction faible, qui semble d'ailleurs jouer un grand rôle pour la constitution primordiale de la matière de l'univers (suppression de l'antimatière).

significative de ce que l'on rapporte implicitement le temps aux phénomènes, même si la conception affirmée par ailleurs est celle d'un temps considéré en lui-même. Quand on dit que la thermodynamique montre le temps comme irréversible, il faut l'entendre de la manière suivante : au niveau macroscopique, l'on ne voit pas, au cours du temps, s'inverser les chaînes d'événements successifs (le cours du temps, paramètre du déroulement de ces processus restant par ailleurs, selon sa définition, le même). En d'autres termes, le film de la réalité ne se déroule pas en marche arrière : nous ne rajeunissons pas en déroulant le cours du temps.

Quant à l'étude de l'évolution de l'Univers, elle semble justifier une flèche cosmique du temps, déterminée par la dynamique de la matière du cosmos et par l'unicité des conditions initiales.

Pour conclure, nous dirons que la physique nous oblige à remettre en question l'idée que le temps et l'espace seraient le contenant ou la forme des phénomènes. Quant au contenant, elle abolit sa séparation d'avec le contenu, dans la mesure où l'un interagit sur l'autre : le temps et l'espace sont indissociables de la matière, la cinématique est indissociable de la dynamique. Quant à la forme, elle inverse, pour ainsi dire, l'ordre de la relation : ce qui définit, conditionne et détermine le temps et l'espace, ce sont les phénomènes physiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1743]. *Traité de dynamique*, David, Paris, 1743. 2ème éd., modif. et augm., David, Paris, 1758.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1758]. *Essai sur les éléments de philosophie ou sur les principes des connaissances humaines*, Paris, 1758. Rééd., suivi des *Eclaircissements* 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.

ATTALI, Jacques [1982]. *Histoires du temps*, Fayard, Paris, 1982.

AUDOUZE, Jean, MUSSET, Paul, PATY, Michel (éds.) [1990]. *Les particules et l'univers. La rencontre de la physique des particules, de l'astrophysique et de la cosmologie*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.

BARROW, Isaac [1670]. *Lectiones Geometricae: in quibus [praesertim] generalia curvarum linearum symptomata declarantur*, London, 1670.

CAPEK, Milic [1976]. *The concepts of space and time. Their structure and their development*, D. Reidel, Dordrecht, 1976.

CLAVELIN, Maurice [1968]. *La philosophie naturelle de Galilée*, Armand Colin, 1968, p. 362-364.

CROMBIE, A.C. [1952]. *Augustine to Galileo. The history of scsience. A.D. 400-1650*, Falcon Press, London, 1952; ré-éd. augm., Heinemann, London, 1957; trad. fr. par Jacques d'Hermies *Histoire des sciences de Saint Augustin à Galilée (400-1650)*, Presses Universitaires de France, Paris, 2 vols., 1958.

DEBRUN, Michel [1993]. Autopoiese, auto-organização e temporalidade, *VIII Colóquio de História da Ciência, Espaço e tempo* (CLE, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, UNICAMP, Univ. de Campinas, Brésil), Águas de Lindoía (S.P., Brésil), 14-17.10.1993.

DESCARTES, René [1737]. *Discours de la méthode, in* Descartes, *Oeuvres*, éd. par Paul Adam et Jules Tannery, Vrin, Paris, vol. 6, ré-éd., 1982, p. 1-78.

DRAKE, Stillman [1970]. *Galileo Studies : Personality, tradition and revolution, University of Michigan Press*, Ann Harbour, 1970..

EINSTEIN, Albert [1905]. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-921. Trad. fr. "Sur l'électrodynamique des corps en mouvement", *in* Einstein, *Oeuvres choisies*, 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, *Oeuvres choisies*, vol. 2, Relativités 1, Seuil, Paris, 1993, p. 179-227.

- [1921]. *Vier Vorlessungen über Relativitätstheorie*, Vieweg, Braunschveig, 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 theoretishen Physik, *Naturwissenschaften* 15, 273-276; trad. angl., *in* Einstein 1954 c, p. 247-255; trad. fr., "La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique", *in* Einstein 1934 b, p. 180-193; autre tr. fr. *in* Einstein 1989-, vol. 5, p.235-241.

EUCLIDE. *Les Eléments de géométrie*, trad. fr. par F. Peyrard, F. Louis, Paris, an XII, 1804.

GALILEI, Galileo [1638]. *Discorsi e dimostrazione matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638; ré-éd., avec introd; et notes, par A. Carugo et L. Geymonat, Boringhieri, 1958.

GEYMONAT, Ludovico [1957]. *Galileo*, Einaudi, Torino, 1957 ; trad fr. par Françoise-Marie Rosset, *Galilée* , Laffont, Paris, 1968 ; ré-éd., Complexe, Bruxelles, 1983; ré-éd., Seuil, Paris, 1992.

HAWKING, Stephen [1988]. *A concise history of time.* Trad. fr. par Isabelle Naddeo-Souriau, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, Paris, 1989.

ITARD, Jean [1984]. *Essais d'histoire des mathématiques*, réunis et introduits par Roshdi Rashed, Blanchard, Paris, 1984.

KANT, Immanuel [1786]. *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1796). Trad. fr. par François de Gandt, *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature* (1786), *in* Kant, Emmanuel, *Oeuvres philosophiques,* vol. 2, Gallimard, Paris, 1985, p. 347-493.

KANT, Immanuel [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.

KOYRE, Alexandre [1935-1939]. *Etudes galiléennes,* Paris, 3 vols., 1935-1939 ; 2 è éd., 1 vol., 1966. (1935-1939), Hermann, Paris, 1966.

KOYRE, Alexandre [1968]. *Etudes newtoniennes.*Gallimard, Paris, 1968.

LAGRANGE, Joseph Louis [1788]. *Mécanique analytique,* in Lagrange, *Oeuvres,* vol.11 et 12, 1888 et 1889.

LAGRANGE, Joseph Louis [1797]. *Théorie des fonctions analytiques,* Imprimerie de la République, Paris, an V.

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

MERLEAU-PONTY, Jacques [1965]. *Cosmologie du vingtième siècle,* Gallimard, Paris, 1965.

NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiae Naturalis principia mathematica,* London, 1687 ; 2ème éd., 1713 ; 3ème éd., 1726, éditée avec des variantes par Alexandre Koyré et I.B. Cohen, Cambridge, . Trad. angl. par A. Motte, *The mathematical principles of natural philosophy,* 1729 ; 3è éd., 1726 ; trad. rév. par F. Cajori, Berkeley, Univ. California Press, 1934.

- [1967-1981]. *The mathematical papers of sir I.N.*, éd. par Derek T. Whiteside, Cambridge University Press, Cambridge, 8 vols., 1967-1981.

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

.- [1994]. 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.

POINCARE, Henri [1905]. 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.

VILAIN, Christiane [1993]. *Huygens et le mouvement relatif,* Thèse, Université Paris 7, 1993.

WHITEHEAD [1919]. *An enquiry concerning the principles of natural kmowledge,* Cambridge University Press, Cambridge, 1919.

WITHROW, G.J. [1980]. *The natural philosophy of time,* Oxford University Press, New York, 1961 ; 2nd ed., 1980.