

*Réflexions sur le concepts de temps**

Michel PATY**

Résumé

On propose quelques réflexions sur le concept de temps, tout d'abord rappelant la diversité des expériences et des consciences du temps, et montrant comment le temps des sciences et de la physique est relié à cette expérience et à cette conscience qui en est prise, notamment en ce qui concerne le rapport entre l'instant et la durée. On s'efforce ensuite de tirer deux leçons des développements sur le concept de temps tel qu'il se présente en physique. La première est que le concept de temps est *construit* par la pensée, et ne nous est pas directement donné, soit par la nature, soit par notre «sens interne». Cela apparaît, notamment, avec l'introduction du temps comme paramètre de la dynamique par Galilée, puis avec la définition du temps «absolu et mathématique» par Newton en vue de constituer le «temps instantané» de la loi fondamentale de la mécanique, et enfin avec la critique des limites de cette conception qui aboutit à la formulation de la relativité du temps et de son lien de constitution à l'espace (construction de l'*espace-temps*). La seconde leçon est que le temps se définit et se détermine *par les phénomènes* (et les objets) de la nature (qui se ramènent aux propriétés de la matière), alors qu'on a longtemps cru l'inverse. Cela apparaît notamment avec la *soumission du temps*, dans la reconstruction du concept effectuée par Einstein, d'abord à *des principes physiques* (avec la relativité restreinte), ensuite avec sa *détermina-*

* Conférence organisée par le Centre National de Documentation Pédagogique dans le cadre de la Fête de la Science, Grand salon de la Sorbonne, Paris, 18 octobre 2000.

** équipe REHSEIS (UMR 7596), Centre National de la Recherche Scientifique et Université Paris 7-Denis Diderot, Centre Javelot, 2, place Jussieu - F-75251 PARIS Cedex 05.
E-mail : paty@paris7.jussieu.fr

tion, conjointement à l'espace (dans l'espace-temps), par les champs de gravitation, qui sont des propriétés de la matière. Ce caractère est également confirmé par la deuxième loi de la thermodynamique et par les développements récents de la cosmologie.

Abstract

We propose some reflections on the concept of time, recording first how the experiences and types of consciousness of time are varied, and showing how time as considered by the various sciences, and among them by physics, is connected to this experience and to the consciousness of it, in particular concerning the relationship between instant and duration. We then endeavour to analyse two lessons of the developments about the concept of time as it comes out in physics. *The first* one states that the concept of time is *built* by thought, and is not directly given to us, be it by nature, or be it by our «inner sense». This appears, notably, with the introduction of time as the variable of dynamics by Galileo, then with the definition of time as «absolute and mathematical» by Newton with the aim of preparing the «instantaneous time» of the fundamental law of mechanics and, finally, with the further critiques of the limits of this conception, that led to the formulation of relativity of time and of the constitutive relationship of time with space (construction of *space-time*). *The second* lesson is that time is defined and determined by the *phenomena* (and objects) of nature (bringing to the properties of matter), whereas the inverse has been thought to be true for a long time. This appears clearly with the *submission of time*, in the reconstruction of the concept as performed by Einstein, first to *physical principles* (with special relativity), then with its *determination*, jointly with space (in space-time), by the *fields of gravitation*, that are properties of matter. This character is also confirmed by the second law of thermodynamics and by the recent developments of cosmology.

1. Les représentations symboliques et l'expérience du temps

Lorsqu'on m'a demandé un titre pour présenter cet exposé, qui devait porter sur la notion de temps, en particulier de temps physique, je n'ai su proposer que celui-ci, «Réflexions sur le temps», car je ne pouvais prétendre faire plus ici, sur une question aussi immense et complexe que le temps, même ramené au seul *temps physique*, que de livrer de simples réflexions sur

l'un ou l'autre de ses aspects. Mais ce qui peut justifier de telles réflexions, c'est qu'elle en suscite d'autres chez ceux qui les écoutent, offrant ainsi vie et continuité dans le temps au très bref et éphémère exercice auquel je suis en train de me livrer dans l'instant présent. Le temps est un problème multiple – peut-être est-il, en même temps, *un* – et même si je suis invité à choisir dans cette pluralité, à privilégier un aspect du temps – ce qui a trait au temps tel qu'on le conçoit en physique –, cet aspect entraîne avec lui d'autres, sans lesquels on ne pourrait en rendre la raison.

C'est que le temps de la physique nous vient, à sa façon, de l'expérience humaine du *temps vécu* et de la *conscience du temps*. Et c'est par là que je vais commencer, en m'y étendant quelque peu, car cette notion de temps-là, nous sommes tous aptes à la comprendre d'emblée, même si elle est diverse, sans avoir encore appris de science. Nous allons voir que *le temps de la science* nous est venu à partir d'elle, du moins selon certaines circonstances.

Puis j'aborderai *le temps de la physique*, avec un aperçu sur le temps tel qu'il est traité par d'autres sciences, sous un point de vue particulier qui me semble éclairer, plus vivement qu'une simple suite chronologique des idées, la véritable «nature» du temps. Ce point de vue est celui des *deux leçons* que nous enseigne, selon moi, l'histoire de l'élaboration des sciences physiques en ce qui concerne le temps. La première est que *le concept de temps est construit* par la pensée, et ne nous est pas directement donné, soit par la nature, soit par notre «sens interne». La seconde est que *le temps se définit et se détermine par les phénomènes* (et les objets) de la nature, alors qu'on a longtemps cru l'inverse, c'est-à-dire que les phénomènes et les objets du monde nous seraient *donnés dans le temps*, ou *selon le temps*, c'est-à-dire que le temps serait leur réceptacle.

Expérience et représentation symbolique

Toute connaissance humaine est de nature *symbolique*. Le temps n'échappe pas à cette commune considération ; mais, également, notre notion de temps nous vient de notre *expérience* d'où nous avons formé notre «conscience du temps».

Si l'expérience du temps comme succession de nos états de conscience est subjective, elle est toujours médiatisée par les systèmes de symboles qui caractérisent une culture. Elle n'est pas exprimée de la même façon dans toutes les civilisations et dans toutes les cultures. Il est impossible d'appréhender le temps de façon directe, comme s'il était une «chose» que l'on pourrait

toucher, ou un objet qui existerait indépendamment des autres objets¹.

Le temps n'existe qu'interprété et symbolique, et prend des formes différentes dans les diverses cultures. Parfois les traductions d'une culture à l'autre sont impossibles ; les diverses notions de temps ne se correspondent pas, et, de même qu'il existe plusieurs langues, il existe plusieurs notions de temps, dont la traduction d'une culture à une autre peut être très difficile. Aucune n'est certainement plus naturelle qu'une autre, et il en va ici du temps exactement comme il en va pour les langues. Il n'y a pas, au départ, une notion de temps idéale ou vraie, qui serait celle à laquelle on devrait se conformer.

Après vingt ou trente siècles de méditation, écrivait Jorge Luis Borges, l'on n'a pas avancé dans le problème du temps. L'on n'a pas avancé, si l'on considère le temps dans la spontanéité de son surgissement dans nos esprits et la diversité infinie des expériences existentielles du temps. Dans ce sens, ce que nous nommons *le temps*, c'est l'expérience d'un présent que nous relierions à la mémoire du passé et, que nous associons à des anticipations possibles. Il est clair que nous n'avons pas *la* solution à la question de ce temps vécu, de ce qu'il est, car l'expérience existentielle est inépuisable – et c'est d'ailleurs pourquoi nous pouvons continuer à penser.

Le présent et la mémoire

Cette question, cette opposition, de *l'instant* et de *la durée*, nous la retrouvons aussi bien quand nous nous interrogeons sur *l'expérience et la conscience du temps* que sur *la représentation objective du temps*. L'instant est saisi dans la durée, il s'évanouit sous l'instant suivant qu'il appelle, ou qui le pousse en le rejetant vers le passé. Il s'écarte de l'instant qui le précède, dont il se distancie de manière très éphémère et pourtant essentielle : l'instant présent est l'instant vécu (qui est en train de se vivre), l'instant passé appartient seulement à la *mémoire*, mémoire humaine du sujet, mémoire sociale (celle des livres, par exemple), mémoire du monde (inscrite dans les cercles concentriques des troncs des arbres, dans les restes fossilisés ou dans les roches et les couches géologiques...).

Ce jeu, ce drame peut-être, du temps et de la mémoire, de l'instant vécu et du souvenir qui résiste à être revivifié, c'est celui qu'évoque magnifiquement, dans toute sa densité et son inextricable complexité, Stéphane

¹ Voir, en particulier, Ricœur [1978], Introduction, p. 11-29, et les diverses contributions à l'ouvrage collectif.

Mallarmé, cet immense poète, dans le sonnet sur «Le vierge, le vivace et le bel aujourd'hui»² : *aujourd'hui*, le moment présent, *vierge* parce qu'il n'a pas encore vécu, *vivace* car il porte en lui la promesse du futur, *bel* car la beauté est une qualification par un jugement qui se fait au présent. L'instant actuel a-t-il la possibilité de redonner vie à ce qui est dans la mémoire ?

«Le vierge, le vivace et le bel aujourd'hui /Va-t-il nous déchirer avec un coup d'aile ivre /Ce lac dur oublié que hante sous le givre /Le transparent glacier des vols qui n'ont pas fui !...» La conscience du présent vécu et le souvenir ensemble constituent l'identité, qui rattache le présent au passé. «Un cygne d'autrefois se souvient que c'est lui (...).» L'oiseau au «pur éclat» tente de s'envoler, de réactiver tout ce qui a été, mais l'entreprise est désespérée («... Magnifique mais qui sans espoir se délivre»), et lui-même, le présent, qui tente son envol, est rattrapé, pris dans les glaces du passé hivernal : «Tout son corps secouera cette blanche agonie /Par l'espace infligé à l'oiseau qui le nie /Mais non l'horreur du sol où le plumage est pris (...).»

Non seulement le présent ne réussit pas à faire revivre le passé inscrit dans la mémoire, mais il se transforme lui-même en passé, et le réel qui n'a pas eu vraiment le temps d'être se fige dans la représentation de l'idée, du souvenir : «Fantôme qu'à ce lieu son pur éclat assigne, /Il s'immobilise au songe froid (...).» Et l'on pourrait ici ajouter l'opposition du temps, qui n'existe que comme une suite d'instantanés chacun présent à son tour, à l'espace dont l'étendue est totalement présente à tout instant, mais seulement dans la mesure où il aura immobilisé le temps, c'est-à-dire où il l'aura nié; inversement, le pur envol du temps nie l'étendue figée de l'espace («Par l'espace infligé à l'oiseau qui le nie...»). L'opposition entre l'instantanéité du temps et la simultanéité de l'espace est rendue tragique dans la conscience vécue... Le drame du temps vécu et de la mémoire, c'est tout le thème de *La recherche du temps perdu* de Marcel Proust, qui cite d'ailleurs, dans *Albertine disparue*³, le second quatrain du sonnet de Mallarmé.

L'instant présent est un îlot sans cesse échangé entre un magma de passé, anciens moments présents refroidis et devenus solides qui s'enfoncent irrémédiablement, et la nouvelle vague montante. Le présent, arc-bouté entre la disparition et le surgissement, est pourtant cela seul qui existe. Le vécu temporel, c'est qu'il y a un présent, qui surgit et éloigne l'instant précédent, l'enfonce vers le passé, opérant une «diastase» ou «distension de l'âme», dont parlait Plotin⁴. Et la conscience du temps, c'est ce qui nous fait organiser le

² Mallarmé [1885].

³ Publiée peu après la mort de l'auteur, en 1925 : Proust [1925].

⁴ Plotin [*Enn.*].

temps vécu, autour d'une plage du présent, à l'aide de la mémoire. L'expérience du temps porte en fait sur une *épaisseur* du temps, qui est plus large que l'intervalle immédiat du présent instantané, le rattachant au passé récent et au passé plus ancien par la mémoire, et au futur par la prévoyance et l'anticipation, mais surtout qui est chargé du contenu de l'expérience. Elle tient à la persistance des situations et des états (comprenant les états de conscience), en raison de stabilités ou de continuités au moins apparentes.

Le temps de la science et son origine dans l'histoire de la philosophie

Il existe, pour nous, dans notre civilisation, dans cette culture particulière qui est la nôtre, une notion de temps entre plusieurs, celle qui a été constituée par la science moderne, et à laquelle je m'en tiendrai dans ce qui suit. Cette science a développé une connaissance du temps, au prix, certes, de l'oubli de beaucoup de dimensions de ce que l'on appelle le temps en général, et d'une grande simplification. On doit remarquer cependant que le temps intériorisé par l'expérience subjective ne peut rester indépendant du reste du monde physique et que malgré ses simplifications, le temps de la science nous éclaire sur le temps en général. Or la physique, la biologie, la science d'une manière globale (et même cette science humaine du temps qu'est l'histoire), ont fait avancer notre conception du temps, et nous permettent, en particulier, de savoir s'il y a des impossibilités dans les représentations que nous nous en faisons.

Le temps apparaît, dans les phénomènes physiques, sous deux espèces différentes: les processus qui sont *réversibles* et ceux qui sont *irréversibles*. Nous ne parlerons pratiquement pas ici des seconds, que nous évoquerons seulement à la fin, nous concentrant sur les premiers. Dans l'histoire des idées, leur opposition se retrouve dans celle entre une *pensée de l'éternité et de la permanence* (comme la philosophie de l'Un éternel, de Parménide) et une pensée du *changement inéluctable* et de l'impossibilité du retour en arrière aux états précédents (comme celle d'Héraclite). Mais je m'attacherai plutôt ici à cette autre *opposition traditionnelle*, que l'on retrouve dans l'histoire de la philosophie occidentale⁵, entre l'approche du temps comme *le temps du monde* (des choses et du mouvement), où l'instant présent est le temps réel, et celle qui le voit comme *le temps de l'esprit* ou *de la conscience*, pour lequel le temps est durée et l'instant n'est qu'une abstraction.

⁵ Voir Ricoeur [1983-1985], tome 3, chapitre 1.

Aristote est un représentant du premier courant, avec sa définition du temps comme le nombre marquant l'avant, le pendant et l'après, mais qui concevait le temps comme une qualité, non comme une quantité. Car, c'est l'âme qui peut mesurer le temps⁶: pour Aristote, le temps dépend de l'âme, d'une certaine façon, et c'est un thème que reprendront Plotin et Augustin, dont nous reparlerons plus loin.

C'est seulement au xiv^e siècle que les savants scolastiques de Paris et d'Oxford se donneraient une conception plus quantitative du temps, paramètre du mouvement, pour représenter les vitesses uniformes, et aussi bien les vitesses non uniformes rapportées aux premières. L'histoire du concept scientifique de temps serait celle d'une construction qui dépouillerait progressivement le temps de ses «qualités» pour le transformer en «quantité» ou «grandeur» mathématisée, cette construction accompagnant les développements de la pensée scientifique, et notamment physique.

Mais on peut suivre aussi, dans l'histoire de la philosophie, en parallèle à cette construction, l'idée du temps comme expérience, comme accompagnant l'expérience humaine vécue, et en particulier l'expérience de la conscience, de Plotin et Saint Augustin à Bergson. Nous nous sommes proposé, en commençant, de nous en tenir pour l'essentiel à la considération du temps physique, à sa construction, à sa relation aux phénomènes. Mais il est utile d'évoquer en préliminaire quelques unes des conceptions marquantes sur *le temps de la conscience*, ou de l'expérience subjective, car elles se tiennent, en réalité, en tableau de fond, voire même au soubassement, de la pensée du temps telle que l'abordent les sciences. En particulier, on doit en tenir compte si l'on s'intéresse aux raisons pour lesquelles le sujet connaissant se préoccupe de concevoir et d'élaborer un concept de temps qui soit adéquat aux phénomènes du monde naturel, et de relier ce temps à *visée objective* à son *expérience subjective du temps*. Descartes, Leibniz et Kant ont été probablement de ceux qui ont essayé de tenir ensemble les deux perspectives, d'ajuster le temps subjectif au temps du monde naturel.

2. Le temps de l'esprit et le temps du monde

La conscience du temps

Plotin, philosophe de l'époque hellénistique, au III^e siècle après J.C.,

⁶ Aristote [*Phys*], livre IV, chap. 11 et suiv., chap. 14, 223a 21-29. Aristote (385-322 av. J.C.), philosophe grec.

écrivait, dans ses *Ennéades*, que «le temps est l'image mobile de l'éternité». «Il doit être à l'éternité, poursuivait-il, comme l'univers sensible est au monde intelligible ; donc, au lieu de la vie intelligible, une autre vie, qui appartient à cette puissance de l'âme et qu'on appelle vie par homonymie ; au lieu du mouvement de l'intelligence, le mouvement d'une partie de l'âme.»⁷ Il en disait encore : «et nous en parlons toujours et à propos de tout. En revanche, quand nous tentons d'en faire un examen attentif et d'aborder le sujet de plus près, nous sommes embarrassés par nos réflexions»⁸. Ce qui nous rapproche de Saint Augustin, lecteur de Plotin, qui fit aussi une remarque semblable, bien connue, dans le traité sur le temps inclu dans ses *Confessions* ⁹.

Augustin¹⁰ se proposait de répondre à la question de savoir ce que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre (à la différence de Plotin, il considérait l'idée d'un univers créé). Il commença par modifier la question, mal posée à ses yeux, puisqu'elle conduit à une impasse en supposant que le temps pré-existe à la création du monde : il énonça donc que *le temps co-existe avec le monde*. Il lui fallait alors redéfinir le temps. Tâche malaisée, car le temps est dans notre conscience et il nous est difficile de le mettre à distance pour l'analyser : «Qu'est ce que donc que le temps ? Si personne ne me pose la question, je sais [parce que je le vis] ; si quelqu'un pose la question et que je veuille l'expliquer, je ne sais plus»¹¹.

Il proposa une élucidation de la différence entre le passé et le futur, eux-mêmes distincts du présent, qui permettait de leur donner une unité. C'est parce qu'il se passe quelque chose au présent qu'il y a ensuite un temps passé, et c'est parce qu'il survient quelque chose au présent qu'il y aura un temps futur. Et, se demande Augustin : «Ces deux temps-là donc, le passé et le futur, comment «sont»-ils, puisque s'il s'agit du passé il n'est plus, s'il s'agit du futur il n'est pas encore ? Quant au présent, s'il était toujours présent,

⁷ Plotin [*Enn.*], I, 11, 7. Plotin (env. 205-270), philosophe dans l'empire romain de l'époque hellénistique, écrivit en grec ses œuvres rassemblées dans les *Ennéades* (six groupes de neuf livres), organisées par son disciple Porphyre. Il s'inspira de Platon (427-347 av. J. C.), et voulut connaître les philosophies de la Perse et de l'Inde ; sa pensée devait exercer une grande influence sur la philosophie et la mystique chrétiennes.

⁸ Plotin [*Enn.*], III 7, 1 ; II, 6-7.

⁹ Augustin [*Conf.*], xi, x, 12-xxx, 40.

¹⁰ Aurelius Augustinus (354-430), né en Afrique du Nord, écrivait en latin, enseigna à Cathage et à Milan. D'abord adepte de la secte manichéenne, il fut ensuite influencé par la philosophie de Plotin. Converti au christianisme, il devint évêque d'Hippone (aujourd'hui Annaba).

¹¹ Augustin [*Conf.*], *idem*, xiii, 15.

et ne s'en allait pas vers le passé, il ne serait plus le temps mais l'éternité". Le présent ne devient tel que parce qu'il s'en va vers le passé : comment peut on dire qu'il est, alors qu'il n'est que parce qu'il ne sera plus ? Ou encore, «Le temps est (...) parce qu'il tend à ne pas être»¹². La solution d'Augustin, c'est de considérer que le temps n'est pas défini par la présence (la présence des choses) mais qu'il est défini dans l'âme (ou dans la conscience), selon trois modes : passé, présent, futur (correspondant respectivement à la mémoire, à la vision, et à l'attente)¹³. Les présents successifs s'inscrivent dans la mémoire. Ainsi être-dans-le-temps peut se dire non seulement du présent mais aussi bien du passé et du futur. Et le passage du temps correspond à l'activité de la conscience (de l'âme consciente), ce qui fait que le temps selon Augustin est ramené au temps psychologique (le temps de la conscience).

Ce lien entre le temps et la conscience se retrouve chez Descartes, plus tard chez Locke et également chez Kant. Mais, pour eux, le temps de la conscience, le temps de l'expérience subjective, est aussi le temps du monde.

Pour Descartes, l'instant, le caractère immédiat du présent, est lié à la connaissance : la certitude d'une vérité, par l'illumination soudaine et instantanée de l'entendement, se produit dans le temps et non pas hors du temps, puisque c'est dans une subjectivité¹⁴. La certitude nous vient dans l'instant, dans l'*intuition* de l'intelligence. Les vérités que nous avons apprises, ou que nous découvrons par l'exercice de la pensée, se rattachent à la certitude immédiate par une chaîne de raisonnements qui fait intervenir la mémoire, où sont inscrits les pas des moments qui sont passés. C'est le caractère différé de cette connaissance par rapport à la certitude qui fait que nous doutons. La seule certitude fondamentale sur laquelle le doute n'a pas de prise, le «*Je pense, donc je suis*»¹⁵ de Descartes, repose sur la simultanéité de notre existence et de notre pensée. Le *cogito* est une intuition, c'est-à-dire un raisonnement ramassé dans l'instant.

Temps vécu et temps du monde

Descartes ne considère pas le temps comme simplement inscrit dans la conscience : il est aussi celui du monde. La discontinuité des instants s'ins-

¹² *Ibid.*, xiv, 17.

¹³ *Ibid.*, xx, 26.

¹⁴ Descartes [1637, 1644]. René Descartes (1496-1650), mathématicien et philosophe français.

¹⁵ «*Cogito, ergo sum*» (Descartes [1637]).

crit dans une continuité du temps : la durée est le fait que les instants n'existent pas en même temps, mais dans une succession continue (les instants, comme les points d'une droite, sont contigües). Il faut rappeler ici que, pour Descartes, le monde, et la connaissance du monde, sont liés à la lumière (voir son ouvrage inachevé de 1633 intitulé *Le monde ou Traité de la lumière*¹⁶) et, par une métaphore signifiante, la certitude est la lumière reçue par la raison¹⁷.

La lumière est liée à la ligne droite et au mouvement ; elle est l'expression parfaite du «mouvement naturel» qui est le mouvement d'inertie (que, avec Galilée, Descartes est l'un des premiers à considérer). Et le lien, tel que l'exprime Descartes, entre les instants successifs sur le trajet de la lumière dont la propagation est (quasi) instantanée, préfigure la succession d'éléments infinitésimaux ou différentiels¹⁸ qui devront attendre, pour être pensés, la mise en forme encore préliminaire des *Principia* de Newton. D'une manière générale, pour Descartes, le mouvement (des corps) se produit parce qu'il y a plusieurs instants (successivement présents), mais dans chaque instant il se trouve une tendance au mouvement (le "conatus", inclination instantanée). A un instant donné, nous ne saisissons pas le mouvement d'une pierre dans une fronde ; et cependant, elle n'est pas arrêtée.

Il faudrait encore mentionner, concernant le temps de la conscience, les conceptions de Locke, de Kant, et plus près de nous, celles de Bergson. Elles sont postérieures à celles de Newton dont je vais parler dans un instant, et très largement influencées par elles. Mais je les évoque avant celles-ci, car il s'agit non pas de constructions conceptuelles du temps, mais encore du temps tel que la conscience en fait l'expérience.

Le propos de John Locke¹⁹, contemporain et disciple de Newton, était de reprendre les considérations sur la connaissance, abordées par Descartes, en la fondant non plus sur des idées innées, comme celui-ci, mais sur l'expérience à partir des sensations. La conscience du temps nous vient du train incessant de nos pensées, et l'instant de temps nous est donné quand nous réussissons à séparer distinctement deux pensées successives²⁰.

Pour ce qui est d'Emmanuel Kant, on sait que, tout en se proposant d'établir les conditions de la pensée du sujet qui rendent la connaissance possi-

¹⁶ Descartes [1633].

¹⁷ Descartes [1637].

¹⁸ Descartes, Lettre à Mersenne, 27 mai 1638, in AT, II, p. 143, et *Méditations* (Descartes [1641]), *Secondes réponses*, dans les «Axiomes ou notions communes», in AT, vol. 7, p. 165 (trad. fr., vol. 9, p. 127). Cf. Paty [1997c].

¹⁹ John Locke (1637-1704), philosophe anglais.

²⁰ Locke [1690].

ble, et singulièrement la connaissance issue de la physique de Newton, il aborde le temps d'une manière purement subjective en en faisant, et de même pour l'espace, une «forme *a priori* de la sensibilité», une «intuition pure», qui permettent à la pensée d'organiser sa compréhension de l'expérience (des objets du monde)²¹. Dans la mesure où il s'agit d'une condition *a priori* de la pensée, conçue à partir des notions newtonniennes, elle devait constituer un obstacle à la critique de l'espace et du temps absolus, qui se feraient jour à la fin du xix^e siècle.

Pour Henri Bergson, dont la philosophie tourne en grande partie autour du temps (voir, par exemple, *Matière et mémoire*, *L'évolution créatrice*, *La Pensée et le mouvant*²²), le temps de la conscience est une donnée première, à laquelle le temps de la science devrait se soumettre : ce qui fait que, pour lui, le temps dans son expression mathématique donnée par la théorie physique (la théorie einsteinienne de la relativité) ne doit pas être interprété directement comme un temps physique, car celui-ci devrait être unique. Cette idée guidera sa lecture de la théorie de la relativité d'Einstein (présentée dans *Durée et simultanéité*²³). Bergson est plus sensible au temps biologique donné dans la théorie de l'évolution, car il lui paraît mieux s'accorder au temps vécu de la conscience, en ce qu'il est un temps créateur de formes nouvelles. Pour lui, la durée est la pâte du temps, et l'instant n'existe pas vraiment, il n'est qu'une abstraction.

Sous-jacente à sa conception du temps physique, on note une position sur le rapport des mathématiques à la physique qui est, selon lui, de pure extériorité. Le temps - et d'autres grandeurs - mathématiques n'ont pas une signification directement physique, même quand elles figurent dans les équations des théories physiques ; formelles, elles ne correspondraient à des grandeurs physiques que si on leur adjoignait une interprétation supplémentaire (par exemple, être conformes au temps perçu de la conscience). La question des rapports entre les mathématiques et la physique s'est trouvée, de fait, au centre des grands débats épistémologiques et philosophiques sur les nouvelles conceptions de la physique contemporaine. D'autres philosophes, comme Ernst Cassirer ou Hans Reichenbach, et même des mathématiciens, comme Paul Painlevé ou même Emile Borel, et des physiciens, comme Hendryk Lorentz, avaient à ce sujet une position qui différait des conceptions d'Einstein ou d'Hermann Weyl (et de l'enseignement effectif de la physique relativiste) tout autant que celle de Bergson. Et, soit dit en passant, c'est

²¹ Kant [1787]. Immanuel Kant (1724-1804), philosophe allemand.

²² Ouvrages publiés respectivement en 1896, 1907, 1934 : Bergson [1959].

²³ Bergson [1922]. Henri Berson (1859-1941), philosophe français.

davantage pour sa conception du *temps vécu* que Bergson a été critiqué par les scientifiques, que pour sa dissociation entre un *temps mathématique* et un *temps physique*²⁴. Bergson avait compris aussi bien que les autres penseurs mentionnés la théorie de la relativité, dans ses raisons physiques et dans son expression formelle, mais il n'avait pas vu que la physique, dans sa construction du temps, élimine le temps vécu de la conscience.

La leçon que nous pouvons tirer du problème posé par Bergson, c'est que notre vue existentielle, notre conscience du temps, doit intégrer la nouvelle conception du temps physique et l'expérience subjective du temps considéré dans son «l'épaisseur temporelle». C'est le philosophe Alfred Whitehead qui parlait de cette «épaisseur temporelle» de la durée, chargée des événements passés, de la mémoire, de l'histoire²⁵. A côté de cela, le temps (différentiel) que construit la physique est un temps simplifié, sans épaisseur, «embouti», sans mémoire, sans histoire, et où les intervalles élémentaires de temps et les instants sont tous identiques, à l'image de ceux de l'espace.

3. La construction intellectuelle du temps objectif

Venons-en maintenant à la représentation et à la construction «objectives» du temps, c'est-à-dire à la mise en rapport de ce dernier avec les phénomènes du monde physique. Nous laisserons de côté les aspects techniques ou instrumentaux de cette mise en relation (sinon en évoquant, sans nous y arrêter, les horloges), y compris sous l'angle astronomique. Je voudrais seulement mentionner ici un aspect qui aurait eu aussi bien sa place avec l'évocation faite, en commençant, de la diversité des expériences du temps dans les diverses cultures, et des difficultés de traduction d'une culture à une autre.

Malgré toutes les différences, il existe des manifestations communes de telles expériences, des sortes d'«invariants», qui n'ont pas besoin, au moins à un premier stade élémentaire, de traduction. Un exemple frappant le fera voir : c'est celui d'une très ancienne réalisation humaine, l'ensemble mégalitique de Stonehenge, dans le sud de l'Angleterre, formé de menhirs et de trilithes monumentaux plantés selon des cercles concentriques, datant d'environ 2000 ans avant J.C. En dehors des cercles se trouve une structure formée

²⁴ Cassirer [1923], Reichenbach [1928]. Voir Paty [1993], chapitres 5, 7. Ernst Cassirer (1874-1946), philosophe néo-kantien, allemand réfugié aux Etats-Unis. Hans Reichenbach (1891-1953), philosophe de l'empirisme logique, allemand réfugié aux Etats-Unis.

²⁵ Whitehead [1919]1925, éd. 1982, chap 9, p. 110. Alfred North Whitehead (1861-1947), philosophe et mathématicien anglais, naturalisé américain.

d'une grande pierre plate posée sur quatre pierres verticales, dont la position est telle que, si l'on se place au centre des cercles, le Soleil vient s'y encadrer à son lever au solstice d'été. Il s'y encadrerait il y a quatre ou cinq mille ans comme aujourd'hui, et c'est une œuvre des hommes, appartenant à une civilisation dont nous ne savons pratiquement rien, qui marque cet événement annuel régulier, cette simultanéité entre la position du Soleil et la disposition de l'édifice des pierres. Cet «observatoire rituel» préhistorique, si c'en est un ou non, marque quelque chose de l'expérience du temps qui est commun à tous les hommes²⁶.

Sautant par-dessus les millénaires, j'en viens à la période moderne, qui commence à conceptualiser le temps, et je la ferai débiter avec Galilée, qui formula *la première loi dynamique* de la physique en y faisant, précisément, figurer *le temps*. Mais on doit mentionner en passant que si le temps n'avait jamais auparavant figuré dans un essai de loi de ce genre, du moins avait-il connu une manière de «préparation» pour ce rôle, en étant conçu comme une sorte de paramètre ou de variable pour exprimer les différences de mouvements. Telle fut l'étude «géométrique» effectuée par les maîtres scolastiques des universités de Paris et d'Oxford, Robert Grossetête (v. 1175-1263), Jean Buridan (v. 1300-v. 1358), Nicolas Oresme (v. 1323-1382)²⁷, notamment, pour représenter sur un diagramme à deux dimensions les valeurs de la vitesse de mouvements en fonction du temps, et déterminer la vitesse moyenne dans le cas d'un mouvement varié. Ces tentatives marquent l'origine de l'approche quantitative du mouvement et constituent une étape importante vers la conception quantitative et physique du temps.

Le temps comme variable de la dynamique

C'est donc avec Galilée²⁸ que naît la dynamique, c'est-à-dire, une loi, et même une théorie, mathématisée (exprimée par une relation entre des gran-

²⁶ Le grand astronome Fred Hoyle (1915-) y voyait, ainsi que pour les ensembles mégalithiques de Carnac, dans la Bretagne française, outre un observatoire pour déterminer le temps, une sorte d'«ordinateur préhistorique» pour pratiquer des interpolations dans la détermination exacte du temps, en vue de ...la prédiction d'éclipses ! Mais cette interprétation, outre ses difficultés propres, suppose une raison calculatoire projetée sur cette culture à partir de la notre, ce qui est historiquement très invraisemblable, méthodologiquement très discutable, et digne de la science-fiction..., dont Fred Hoyle fut également un auteur brillant (Hoyle [1972]).

²⁷ Voir, p. ex., Crombie [1952], vol. 1.

²⁸ Galileo Galilei (1564-1642), mathématicien et physicien italien.

deurs mathématiques à signification physique), de certains phénomènes physiques. Le temps entre déjà comme paramètre dans la loi trouvée par Galilée de l'isochronisme des petites oscillation du pendule, dont Vincenzo Viviani, son élève, nous a laissé le récit, recueilli de la bouche du savant lui-même, vers la fin de sa vie. A l'âge de vingt ans, observant le balancement des lustres dans la cathédrale de Pise²⁹, Galilée eut l'impression que le temps d'une oscillation était le même quelle que soit l'amplitude, et l'attribua au fait que la vitesse lui paraissait plus grande quand l'arc décrit est plus grand et plus incliné. Il fit ensuite des expériences pour vérifier cette idée, sur des pendules faits de balles de plomb (puis d'autres matières) suspendues à un fil, dont il fit ensuite varier la longueur. Il observa de la sorte l'isochronisme des petites oscillations, pour une longueur donnée, quels que soit le poids ou la densité des balles, et établit aussi la loi du pendule, exprimée par une relation entre la longueur du pendule et la fréquence des oscillations.

On voit ici, pour le dire en passant, comment d'une observation attentive surgit une idée et comment naît l'expérience contrôlée qui permet d'étudier méthodiquement le comportement du phénomène suivant chacune des variables du problème, ce qui permet ensuite de formuler une loi³⁰. Galilée envisagea aussi la possibilité de mesurer exactement le temps avec un pendule, idée que Christiaan Huygens reprendrait, comme nous le verrons.

Mais la découverte de Galilée la plus importante pour notre propos, ce fut celle de la loi de la chute des corps. Benedetti, étudiant de Tartaglia, s'était proposé de réfuter l'explication donnée par Aristote, selon laquelle la vitesse de chute est proportionnelle au poids du corps : selon lui, elle était proportionnelle à la densité, ce que Galilée crut lui aussi pendant assez longtemps. Benedetti avait observé également que la vitesse de chute libre augmente avec le mouvement du corps, et Galilée se proposa d'en trouver la loi mathématique. Par un argument de simplicité (selon lequel la nature choisit les voies les plus simples et les plus aisées), il posa d'abord que la vitesse de chute est tout simplement proportionnelle à la distance. Mais il réalisa par la suite que cet argument conduirait à l'impossibilité du mouvement, par un raisonnement du type de celui de Zénon.

Puis il s'aperçut que la bonne variable n'était pas la distance, mais *le temps* : le mouvement de chute des corps est uniformément accéléré, c'est-à-dire que la progression des distances de chute est proportionnelle au carré des

²⁹ On laissera de côté le fait, après tout secondaire, que le lustre, à l'époque, n'était pas encore, semble-t-il, suspendu dans la cathédrale. Il aurait pu tout aussi bien en observer un autre ailleurs.

³⁰ Galilée [1638]. Voir Gindinkin [2000].

temps. Le choix du temps comme variable de la loi dynamique représente une innovation conceptuelle très importante³¹, à une époque où la mesure exacte du temps ne faisait pas partie des préoccupations des savants ni, d'ailleurs, comme les historiens nous l'assurent, de la société. Cette relative indifférence devait par la suite changer, en raison de ces événements et de cette innovation, et le nom de Huygens devait y être étroitement attaché.

La jonction de la représentation mathématique et de la mécanisation : Huygens.

C'est donc à Christiaan Huygens³², succédant en cela directement à Galilée et à ses travaux sur le pendule (il lui succéda aussi pour l'astronomie, en découvrant l'anneau de Saturne), qu'il revint d'assurer la possibilité théorique et pratique de mesurer exactement le temps. Cette réalisation s'inscrivait dans la série de ses recherches sur les lois du mouvement, poursuivant le rapprochement entre les mathématiques et la physique, en l'occurrence à la jonction de ses préoccupations pour la théorie et la pratique. Sa grande préoccupation fut, toute sa vie, de parvenir à la mise au point d'un chronomètre marin parfait, et c'est dans cette perspective qu'il pensa de nombreux problèmes, soit de mouvement des corps, soit de mathématiques, aboutissant à des résultats d'une grande nouveauté (développements des courbes, expression de la force centrifuge³³, pleine expression de la relativité du mouvement pour la mécanique classique, etc. , sans compter ses travaux de mathématiques qui préparent le calcul différentiel), parmi lesquels les courbes tautochrones et les pendules cycloïdes³⁴.

Huygens identifia, en effet, la «courbe tautochrone» comme étant la cycloïde, et mit au point avec un artisan horloger, en 1656, la première horloge à pendule relativement précise, en conformité avec les lois du mouvement et de la pesanteur, menant ainsi à leur terme les idées de Galilée sur l'isochronisme (voir son ouvrage *Sur les Oscillations des horloges, Horologium oscillatorum*)³⁵. L'inexactitude du temps donné par cette horlo-

³¹ Voir Paty [1996c].

³² Huygens [1673]. Christiaan Huygens (1629-1695), physicien hollandais.

³³ Indépendamment de Newton.

³⁴ Voir Gindinkin [2000].

³⁵ Huygens [1673]. *Horologium oscillatorum, sive de motu pendulorum ad horologia adaptato demonstrationes geometrica*, c'est-à-dire *Preuves, ou Démonstrations, géométriques relatives au mouvement des pendules adaptés aux horloges*.

ge était de dix secondes par jour, au lieu de plusieurs minutes antérieurement. Un peu plus tard, en 1761, le chonomètre de Harrisson, insensible aux mouvements de tangage et de roulis des bateaux sur la mer, apporta des améliorations considérables dans la détermination de la longitude en mer à partir de la différence entre l'heure de référence et l'heure locale (cette dernière étant déterminée par la hauteur du Soleil ou d'étoiles)³⁶.

Notons dès ici, en référence à la seconde leçon que nous tirerons de l'histoire du concept physique de temps, que les horloges mécaniques et les différentes sortes d'horloges qui les suivront (les horloges atomiques au xx^e siècle) témoignent d'une certaine façon de ce que *le temps nous est donné par les phénomènes physiques*. Mais cela, déjà, le temps commun de l'expérience de la nature le faisait sous-entendre, et les habitants des campagnes l'avaient compris depuis des temps immémoriaux... Nous verrons cependant Newton le masquer par l'interposition de son temps absolu, le temps astronomique n'étant jamais que le temps sensible, celui que nous mesurons (corrigé, précisait-il, par l'équation astronomique)³⁷. Mais Huygens, comme avant lui Galilée et Descartes, ne considérait que le temps relatif, donné par le mouvement des corps.

Le temps instantané de la physique newtonienne

Isaac Newton, dans les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, après avoir défini les notions qui allaient lui être utiles pour la mécanique, étude du mouvement des corps, écrit ceci : «Quant [aux termes] de temps, d'espace, de lieu et de mouvement, ils sont connus de tout le monde»³⁸. Et cependant, il juge bon de préciser, pour redresser des erreurs commises à leur sujet, comment il faut réellement les concevoir, en faisant des distinctions qui étaient, en fait, bien loin d'être communément conçues à l'époque : «Pour les éviter [les erreurs], poursuit-il, il faut distinguer *le temps, l'espace, le lieu et le mouvement, en absolus et relatifs, vrais et apparents, mathématiques et vulgaires.*»³⁹

Jusqu'alors les savants et les philosophes, dans leur très grande majorité, concevaient ces notions comme *relatives* aux objets sensibles (ou matériels).

³⁶ Voir, p. ex., Pomian [1984], p. 265-266.

³⁷ Newton [1687], livre I, scholie général des définitions ; trad. fr. par Mme du Châtelet.

³⁸ *Ibid.* Isaac Newton (1642-1727), physicien, mathématicien, philosophe «de la nature», et théologien anglais.

³⁹ *Ibid.*

Galilée et Descartes, Huygens, Leibniz pensaient ainsi. Newton propose donc de considérer qu'il existe, sous-jacent aux notions qui nous viennent des relations aux objets sensibles, des notions absolues, en particulier un *temps absolu, vrai et mathématique*, opposé au *temps relatif, apparent et vulgaire*.

La définition du temps newtonien est bien connue : «Le temps absolu, vrai et mathématique, en lui-même et de sa propre nature, *coule uniformément* sans relations à rien d'extérieur, et d'un autre nom est appelé *Durée*. Le temps relatif, apparent et vulgaire est une mesure quelconque (qu'elle soit précise ou imprécise) dont le vulgaire se sert ordinairement à la place du temps vrai, tels, l'heure, le jour, le mois, l'année.»⁴⁰ Le temps est ici défini comme *flux* («durée»), et quelques pages plus loin, Newton construit géométriquement, à partir de cette grandeur continue qu'est *la durée, l'instant* sans dimension, discontinu, de l'événement qui change le mouvement (par l'introduction d'une accélération).

On voit donc que Newton, qui prétendait que le temps est une notion connue de tous, qui n'a pas besoin de définition, se trouvait en réalité obligé de le construire : *il construisit un nouveau concept de temps*, un temps mathématique, exact, et réel comme les objets du monde qu'il régit. Et ce concept, il le construisit sur le même mode dont il avait constitué ses fameuses *fluxions* (dont l'origine était précisément le flux avec le temps), qui sont l'équivalent de ce que Leibniz de son côté avait inventé sous la forme de *différentielles*.

Cette introduction de notions absolues lui était nécessaire pour deux raisons, qui tiennent à ses conceptions générales sur la nature et sur la connaissance, et se rattachent à une philosophie néo-platonicienne qu'il partageait avec ses maîtres de Cambridge (Henry More, Isaac Barrow...), selon laquelle *la vraie réalité est idéale et mathématique*.

La première raison est qu'il mettait ainsi en place la *justification d'une approche mathématique* des problèmes du mouvement. Le temps, l'espace et le mouvement absolu l'autorisaient, estimait-il, à traiter rigoureusement des grandeurs qui n'étaient jusqu'alors que conçues selon des approximations. Il pouvait ainsi élaborer une géométrie du mouvement où intervient le temps, où les grandeurs géométriques peuvent être mises en relation avec une durée variable, que l'on peut faire tendre vers zéro pour obtenir *l'instant même*, sans extension (comme un point est sans extension), *où le mouvement change*.

Car tout le problème de la mécanique, pour Newton, était le *changement*

⁴⁰ Newton [1687], livre I, scholie général des définitions ; trad. fr. par Mme du Châtelet. Souligné par moi, M.P.

de mouvement, qu'il pouvait, dès lors, exprimer par sa «seconde loi du mouvement», à savoir, la proportionnalité de la force à l'accélération (que l'on écrit classiquement aujourd'hui $F=m\gamma$, F étant la force appliquée au corps, m sa masse et γ l'accélération, et que l'on appelle loi de causalité newtonienne). Cette loi est exprimée pour un instant donné, par la *mise en rapport du temps* (saisi comme durée et ramené, par passage à la limite, à l'instant) *et de l'espace* (saisi comme distance, ramenée à la limite au point de tangence à la courbe de la trajectoire). En quelque sorte, le caractère mathématique des grandeurs l'autorisait à élaborer un temps (instantané, mais que Newton ne parvenait pas encore bien à conceptualiser ainsi) approprié à la loi qui détermine le taux de changement de mouvement, produit par l'action d'une force d'un instant à l'instant immédiatement suivant. Il était, à ses yeux, important que cette idéalisation mathématique soit justifiée, et elle l'était, pour lui, si l'on admettait le caractère absolu du temps, de l'espace, et du mouvement⁴¹.

On ne saurait trop souligner la nouveauté considérable qu'a représenté le *temps newtonien*, sur les plans conceptuel et théorique : mais c'est le *temps instantané*, non le *temps absolu*, le second n'ayant été, au fond, que le prétexte pour justifier le premier, seul réellement effectif dans le développement de la mécanique newtonienne, puis de la mécanique rationnelle. Le temps était traité comme une variable continue, avec la possibilité de passer à la limite pour la détermination d'un instant singulier : le temps mathématique de Newton revient, en fait, à une grandeur différentielle. La conceptualisation du temps instantané permettait de concilier ce qui était jusqu'alors apparu comme une énigme insurmontable, le temps *comme durée* et *comme instant*. La flèche de Zénon ne pouvait pas être en mouvement : le temps représenté, comme l'espace, à travers la mathématisation du calcul différentiel⁴², supprimait tout paradoxe et résolvait le *problème du continu* pour la physique (le *mouvement continué*, avec ou sans changement). Newton levait, en quelque sorte, l'impossibilité logique du mouvement en exprimant la loi, mathématisée, de ce dernier.

La seconde raison qu'avait Newton de donner un caractère absolu à ces grandeurs, c'est qu'il lui fallait trouver un *support physique à l'accélération*: que le changement de mouvement ne soit pas illusoire, qu'il soit effectif,

⁴¹ *Ibid.* Voir Paty [1994, 1995].

⁴² A strictement parler, le *calcul différentiel* ne serait appliqué au mouvement que par Leibniz et ses disciples. Le *calcul des fluxions* de Newton lui est équivalent. Et aussi le calcul «des premières et dernières raisons», c'est-à-dire des passages à la limite en géométrie dynamique, mis en œuvre dans les *Principia*. On parlait encore, de manière équivalente, de «calcul infinitésimal».

qu'il soit changement (de mouvement) *par rapport à quelque chose* ; et ce quelque chose était l'espace absolu, support des accélérations, qu'il décrivait comme tel dans le commentaire (ou *scholie*) qui suit les définitions et précisions.⁴³ Et le temps, étant lié à l'espace, devait être lui aussi absolu pour que l'accélération le soit et que le changement de mouvement ne soit pas seulement relatif, et donc, à ses yeux, illusoire.

La mécanique newtonienne permet de connaître l'état du mouvement futur ou passé à partir d'un état initial. La variable de référence est le temps, que Newton décrit comme uniforme, ce qui est tautologique : le temps est uniforme par rapport à quoi? si ce n'est par rapport au temps lui-même... Mais cette tautologie est significative : elle fait du temps la référence fondamentale du mouvement.

Dans sa définition du temps absolu rappelée ci-dessus, Newton l'établit comme cadre des phénomènes et des corps, de même que l'espace, symétriquement. Le temps dans cette acception, préexiste aux phénomènes. Remarquons cependant que la construction de Newton est faite *pour que le temps puisse*, précisément, *être le cadre des phénomènes*, c'est à dire qu'il n'en est pas aussi indépendant qu'il y paraît, du moins quant à sa construction. Ces phénomènes sont ceux du mouvement.

Observons encore que le caractère absolu du temps fait que toute simultanéité d'événements se produisant en un lieu, et donc au même instant, est aussi simultanéité dans un autre. La simultanéité dans la physique newtonienne est absolue parce que le temps est absolu, et elle ne tient pas compte des actions qui ne sont pas instantanées. En corrélation à ses définitions, Newton considère, au livre III des *Principia*, la force de gravitation comme une attraction instantanée. C'est à Einstein qu'il reviendrait, deux siècles plus tard, de mettre en évidence le rapport de solidarité entre ces deux caractères, la *simultanéité absolue* et l'*action instantanée*.

Critiques du caractère absolu du temps physique et limites des concepts de la mécanique

Ajoutons enfin que le temps et l'espace newtoniens, tout en étant absolus, sont physiques. Ils sont le cadre, la scène, physique, des phénomènes physiques. Mais, en même temps, ils comportent une grande part d'arbitraire, dans leur définition, qui ne les rattache en fait que de très loin aux phénomènes physiques.

⁴³ Newton [1687], livre I, scholie général des définitions.

C'est ce caractère arbitraire, cet éloignement de la considération des corps physiques effectifs, qui révélera peu à peu les insuffisances du temps et de l'espace newtoniens conçus comme absolus.

Ils ne devaient pas manquer d'être critiqués, et ils le furent d'abord d'un point de vue philosophique, par Leibniz, un peu plus tard par Berkeley⁴⁴. Puis la philosophie les admit, tout en les adaptant, à la suite de Kant. Ils restèrent également longtemps acceptés par la physique, en raison des succès de la mécanique, développée sur les bases posées par Newton, bien que les raisons néo-platoniciennes qui les avaient appelées chez ce dernier ne fussent plus considérées par les physiciens des générations suivantes. A partir du xviii^e siècle (avec d'Alembert notamment), l'identité du temps physique et d'un temps mathématique idéal fut dépassée dans la conception d'une *pensée mathématique* du temps physique, liée à une conception de l'intelligibilité rationnelle plus cartésienne que newtonienne⁴⁵.

D'un autre côté, des éléments de connaissance en physique se mirent peu à peu en place au xix^e siècle, qui devaient aboutir à montrer que le temps absolu est contraire aux caractères physiques des propriétés des corps, notamment en raison de son lien aux actions instantanées (comme la gravitation, attraction instantanée à distance), alors que toutes les actions dans la nature apparurent se faire à vitesse finie : la propagation de la lumière, l'écoulement des fluides, les actions électriques et magnétiques et, plus tard, la gravitation elle-même.

La physique trouvait d'ailleurs ainsi une raison profonde pour que le déroulement d'un processus dans le temps, une fois définies les conditions initiales, aille ensuite toujours de l'avant vers l'après. Elle assurait ainsi la nécessité du *cours du temps* (c'est-à-dire de la cause à l'effet), qu'il faut distinguer de l'irréversibilité⁴⁶. Maxwell établissait, en effet, à propos des phénomènes électromagnétiques, qu'aucune propagation à distance ne se fait instantanément, avec une vitesse infinie (comme Newton le croyait pour les forces de gravitation), et qu'il n'existait pas d'ondes retardées, ce qui séparerait radicalement la cause et l'effet (dont on pouvait renverser le rapport dans la mécanique) et parachevait la causalité newtonienne, en lui retirant tout arbitraire.

Le concept de champ à vitesse finie de propagation, qui se développa au cours du siècle, était en fait un «corps étranger» pour la toute-puissante méca-

⁴⁴ Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), mathématicien et philosophe allemand. George Berkeley (1685-1753), philosophe et théologien britannique.

⁴⁵ Paty [2001].

⁴⁶ Sur cette distinction, voir Paty [1994].

nique, et devait obliger à repenser et reconstruire ses concepts les plus fondamentaux, tels que l'espace et le temps absolus, la masse invariable... Mais cela n'apparaîtrait clairement que lorsque les tentatives de concilier la mécanique avec le concept de champ se trouveraient dans l'impasse et que la solution serait obtenue, précisément, par une modification des concepts de la mécanique qui tiendrait compte des exigences du champ. La modification de la définition du temps serait au premier rang de ces transformations.

Avant celles-ci, l'idée de temps absolu comme cadre pour les objets et les phénomènes du monde était généralement considérée comme naturelle et donnée : nous nous la formons, pensait-on, à partir de l'expérience des objets et de leurs mouvements. Elle devait subir une critique épistémologique sévère vers la fin du xix^e siècle, avec Mach et Poincaré notamment, avant d'être remise en question, à la fois conceptuellement et théoriquement, par Einstein. Le temps devait alors être progressivement considéré comme ne nous étant pas tant *donné* que *pensé*, *construit* intellectuellement, à partir de notre expérience et de notre connaissance des objets et des phénomènes de la nature.

«Pour le chercheur qui étudie la nature, les déterminations du temps ne sont pas autre chose que des énoncés abrégés de la dépendance d'un événement sur un autre», écrivait Ernst Mach dans ses *Conférences populaires*⁴⁷. Il faisait ainsi remarquer que, quand on parle de l'accélération d'un corps qui tombe en chute libre, on la rapporte à la vitesse par seconde considérée par rapport au centre de la Terre, et que, pour être exact, il faudrait tenir compte du mouvement de la Terre par rapport aux autres corps célestes. On simplifie la situation en rapportant les événements non pas à la Terre, mais à une horloge, de telle sorte que «l'illusion nous vient que le temps a une signification indépendamment de tout»⁴⁸. Mach, ainsi que Poincaré, firent des critiques précises des concepts de temps et d'espace newtoniens. Celles de Mach eurent une influence décisive sur la pensée d'Einstein, et celles de Poincaré lui permit de concevoir, comme Einstein, que le temps physique des horloges dans des référentiels en mouvement relatif était différent⁴⁹.

Il était déjà clair par là que le temps est *construit*. Si nous l'avons suivi ainsi depuis Galilée et surtout Newton, ce caractère de construction n'était pas encore conçu explicitement, et il ne commença de l'être qu'alors, à la fin du xix^e siècle. On allait bientôt se rendre compte, plus radicalement encore, qu'il est *déterminé* dans sa nature même par les phénomènes (physiques).

⁴⁷ Conférence sur «La nature économique de la physique» (1882), in Mach [1898], p. 186-213 (p. 204). Ernst Mach (1838-1916), physicien et philosophe autrichien.

⁴⁸ Mach [1898], p. 205.

⁴⁹ Mach [1883], Poincaré [1898, 1912]. Voir Paty [1993, 1996a].

4. Le temps et les phénomènes

Je ne puis ici retracer l'histoire des travaux théoriques (et aussi observationnels et expérimentaux) qui ont amené les changements de conceptions indiqués. Je mentionnerai seulement, avant de rappeler ce qu'a apporté à cet égard la pensée d'Einstein, que l'un des grands problèmes fondamentaux de la physique qui se posaient au tournant du xix^e et du xx^e siècles était celui des phénomènes électromagnétiques dans leur rapport au mouvement, c'est-à-dire celui du rapport entre les deux théories qui en traitaient, la *théorie électromagnétique* de Maxwell⁵⁰ et la *mécanique «classique»* issue de Newton. En particulier, la théorie de Maxwell faisait de la *lumière* une *onde électromagnétique*, et les problèmes de l'*optique* étaient donc désormais inclus dans les problèmes de l'*électromagnétisme*. Parmi les travaux les plus significatifs qui s'effectuaient alors sur l'*électrodynamique des corps en mouvement*, on peut citer ceux de Heinrich Hertz, Max Abraham, Joseph John Thomson, Hendryk Lorentz, Wilhelm Wien, Henri Poincaré, Paul Langevin et, le dernier venu, Albert Einstein. Celui-ci donna, en 1905, pour sa première contribution sur le sujet, la solution la plus complète du problème du point de vue physique (en s'appuyant sur des résultats antérieurs de plusieurs de ces chercheurs, et notamment de Lorentz).

Une solution aux difficultés de la théorie électromagnétique

Dans sa solution aux «difficultés de l'électrodynamique», Einstein fit intervenir une modification de la définition du concept de temps qui lui faisait perdre la caractère absolu que lui avait donné Newton. Le temps de la relativité einsteinienne est *physique, mathématique et relatif* ; il est aussi le temps *sensible* que donnent les horloges et qu'attestent les phénomènes physiques. Et, s'il était tel, c'est qu'il avait été précisément *construit* pour cela, comme nous allons le voir (brièvement⁵¹).

Einstein ne se proposait pas, au début, de reformuler le temps newtonien, mais de trouver une solution aux difficultés rencontrées avec l'électrodynamique des corps en mouvement. Ces difficultés se ramenaient, à l'analyse, à une contradiction entre la théorie électromagnétique de Maxwell-Lorentz, et la mécanique, théorie du mouvement des corps dans l'espace. Einstein fit,

⁵⁰ James Clerk Maxwell (1831-1879), physicien britannique.

⁵¹ Je renvoie à d'autres études plus détaillées sous divers aspects : Paty [1993, 1994, 1996b, 1997a, 1999h, 2000].

pour le dire rapidement, le diagnostic suivant : les phénomènes électromagnétiques et optiques se comportent dans les faits comme s'ils obéissaient au principe de relativité (valable en mécanique) alors que leur théorie, basée sur un éther en repos absolu, siège de la propagation des champs et des vibrations lumineuses, est contraire à ce principe. La solution ne pourrait résulter que d'un ajustement de la théorie électromagnétique avec le principe de relativité, c'est-à-dire avec ce qui constituait la propriété la plus centrale de la mécanique. Pour autant, la mécanique ne pouvait rester indemne, plusieurs phénomènes ayant montré ses limites, et Einstein connaissait également la critique par Mach et par Poincaré de ses concepts. (Cependant, nous allons voir que la faiblesse de la mécanique lui apparut sous un angle que personne avant lui n'avait relevé.)

Il fallait modifier les deux théories pour les rendre compatibles entre elles, et les modifier, donc, l'une par l'autre, tout en gardant de chacune ce qu'elle avait d'universellement valable, leurs propositions physiques les plus fondamentales ou *principes*. Einstein les énonça de la manière suivante : la *relativité du mouvement* (d'inertie) pour la mécanique, la *constance de la vitesse de la lumière* indépendamment du mouvement de sa source pour l'électromagnétisme. Il en fit les deux principes que les deux théories (et, en fait, toute théorie) se devait de respecter. Or, ces deux propositions ou principes, constatait-il, sont incompatibles, puisque, la vitesse de la lumière (dans le vide), précisément elle, étant déterminée dans l'éther au repos (l'éther, support de la lumière et des champs électrique et magnétique), *ne peut être la même* dans un référentiel en mouvement, et contrevient donc au principe de relativité.

Cependant, à force de méditer sur cette impossibilité, Einstein eut soudain l'idée d'en rendre la raison explicite. Quand on considère un rayon lumineux en mouvement par rapport à un corps lui-même en mouvement, on ajoute ou on retranche normalement la vitesse du second (l'entraînement de la Terre par exemple) de celle du premier (la vitesse de la lumière par rapport à l'éther). La vitesse de la lumière ne sera donc pas la même par rapport à l'éther et par rapport à un corps entraîné dans un mouvement, pour cette raison même. L'impossibilité de concilier les deux principes tenait, en fait, à une règle de la mécanique si bien établie depuis Galilée qu'elle paraissait naturelle et absolue : la règle d'addition galiléenne des vitesses ($V = v + v'$ en grandeur et direction). Une troisième proposition (venant de la mécanique) se tenait implicitement sous les deux principes. Ne pouvait-on l'abandonner, laissant ainsi *les deux principes indépendants l'un de l'autre*, et donc compatibles?

Toute simultanéité est relative

Abandonner la règle d'addition des vitesses, cela signifiait reconsidérer la définition de la vitesse, rapport de la distance parcourue à la durée du parcours, et donc reconsidérer les définitions des distances et des durées, c'est-à-dire en définitive celles de l'espace et du temps. Considérant le mouvement d'un mobile par rapport à deux référentiels de coordonnées différents, en mouvement relatif, et le soumettant à la condition de respecter les deux principes posés (de relativité, et de constance de la vitesse de la lumière), Einstein montra tout d'abord que deux événements simultanés dans un des systèmes ne le sont pas dans l'autre, car il faut tenir compte de la durée (finie) de propagation des signaux d'un système à l'autre pour porter des jugements de simultanéité.

En même temps que l'instantanéité des actions était déclarée impossible, la *simultanéité* apparaissait donc comme une *notion purement relative*. Il n'y a pas de simultanéité absolue du temps, ou de coprésence au même instant de tous les lieux et objets de l'univers. Si une cloche tinte, ici, pour nous, au midi de notre horloge, ce son au même endroit n'est pas perçu à la même heure lue à sa propre horloge par un voyageur de l'espace qui passe au-dessus de nous, animé d'un mouvement très rapide.

Le temps soumis aux principes physiques

Dans la suite immédiate de cette remise en cause, il apparut que la soumission de l'espace et du temps aux deux principes physiques choisis devait les unir indissolublement. En tenant compte de la durée de transmission, et appliquant, pour cette dernière, les deux principes, Einstein définit les coordonnées d'espace et de temps dans l'un des systèmes et obtint la *formule de transformation de coordonnées* qui fait passer dans le second. Il s'avéra alors que la condition posée aux variables de temps et d'espace par le *respect des deux principes* est telle que, en particulier, le temps, qui était toujours considéré comme étant inchangé dans les deux systèmes dans les transformations de Galilée, n'est plus le même dans les deux systèmes de coordonnées. Cela constituait une sorte de révolution pour la physique, *le temps transformé* étant une *fonction* non seulement *du temps du premier système* de coordonnées, mais aussi des *coordonnées d'espace* elles-mêmes.

Pour ainsi dire, *l'espace entre dans le temps* (avec Galilée, c'était seulement le temps qui entrait dans l'espace transformé), c'est-à-dire que l'on ne

peut pas penser le temps sans penser au mouvement qui anime les corps par rapport auxquels on considère ce temps, et l'on a une *symétrie entre le temps et l'espace*. De ces formules de transformation, *mathématiques* mais aussi *physiques*, en ce qu'elles sont obtenues pour les grandeurs *espace* et *temps* par l'imposition de *conditions physiques* (celles des deux principes), plusieurs propriétés se déduisaient directement : la *contraction des longueurs* dans la direction du mouvement et la *dilatation des durées*, dans le système en mouvement relatif par rapport à l'autre ; une nouvelle formule de composition des vitesses (assurant le non dépassement de la *vitesse de la lumière*, devenue, donc, *vitesse limite*⁵²) qui représente le couronnement de cette nouvelle cinématique.

La *cinématique* réformée, «relativiste», avait pour conséquence une reformulation de la *dynamique*, tant pour la mécanique que pour l'électromagnétisme, dont les équations fondamentales étaient modifiées. La théorie électromagnétique n'avait plus besoin de se baser sur un milieu, l'éther, et l'on pouvait désormais penser les champs comme des grandeurs physiques autosuffisantes sans support de type «intuitif-mécaniste» (l'éther comme milieu continu à la fois élastique et rigide, image qui impliquait d'ailleurs contradiction).

Les relations physiques dans l'espace-temps

Les nouvelles relations de l'espace et du temps de la relativité restreinte furent peu après formulées de manière géométrique par Hermann Minkowski⁵³, qui reprit une suggestion de Henri Poincaré⁵⁴, d'exprimer le temps comme une quatrième dimension d'espace ($x_4 = ict$), ce qui généralisait l'espace de la géométrie à l'*espace-temps* de la mécanique et de la physique. Dans cette extension, il existe une quantité invariante fondamentale sous les translations et les rotations, la distance entre deux points, $s^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$, comme pour l'espace à trois dimensions, $s^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$: c'est le théorème de Pythagore généralisé. Notons que l'idée de considérer la *mécanique*, qui incorpore la géométrie mais lui ajoute la considération du

⁵² Le rôle fondamental de la vitesse de la lumière comme vitesse limite, qu'il n'est pas possible de dépasser, était également reconnu à peu près en même temps, mais suite à un raisonnement différent, par Lorentz et Poincaré

⁵³ Minkowski [1908]. Hermann Minkowski (1864-1909), mathématicien allemand.

⁵⁴ Henri Poincaré (1854-1912), mathématicien, physicien et philosophe français. Dans la relation, i représente le nombre imaginaire pur (racine carrée de -1).

temps, comme une *géométrie à quatre dimensions*, dont la quatrième dimension serait le temps, avait été envisagée dès le xviii^e siècle, par d'Alembert puis par Lagrange⁵⁵. Mais ce n'était qu'une représentation possible et purement formelle, alors que la théorie de la relativité restreinte implique un lien de nécessité entre les coordonnées d'espace et de temps.

Ce lien de nécessité et les propriétés de l'espace-temps sont rassemblées dans la représentation du «cône de lumière» dans l'espace-temps, déterminé selon les axes (x pour l'espace, t pour le temps), qui détermine trois zones : la nappe du cône, qui correspond à la propagation de signaux ou d'actions avec la vitesse de la lumière ($x = ct$), l'intérieur du cône où des relations causales ($x < ct$) sont possibles), et l'extérieur du cône, où elles ne le sont pas ($x > ct$). Tout événement correspondant à un point ou à une région de l'espace-temps situé à l'extérieur du cône de lumière relié à un événement donné est absolument et définitivement étranger à ce dernier, puisqu'il n'existe entre eux aucune possibilité d'être reliés physiquement : cette région de l'espace-temps est «a-causale» ou «non-physique»⁵⁶.

Le cône de lumière est le lieu des points d'espace-temps qui peuvent être reliés entre eux par une action causale : il exprime aussi que chacun de ces points possède un avant et un après qu'il n'est pas possible d'inverser. Tout cela marque que la *dimension temporelle est différente* des autres, en raison de son *lien de causalité à l'espace*, qui fait la «métrique» de l'espace-temps (à quoi il faut ajouter que *le temps reste irréversible*, même si cela ne se marque pas plus dans la théorie de la relativité au sens strict que dans la mécanique).

Les propriétés des intervalles de temps et des distances dans des systèmes de référence en mouvement relatif ont pu paraître, lorsqu'elles ont été proposées, des défis au sens commun. Et pourtant, elles sont bien physiques, et le sens commun des physiciens s'y est désormais accoutumé. Tel est l'apparent paradoxe de l'expérience de pensée des «jumeaux de Langevin». Deux jumeaux, l'un resté sur terre, l'autre voyageant dans l'espace à très grande vitesse, vieilliraient à des rythmes différents. Revenu sur terre après deux années de son temps, le voyageur retrouvera son frère vieilli de quarante ans

⁵⁵ Voir Paty [1998c].

⁵⁶ Quelques physiciens ont bien supposé l'existence de «tachyons», des particules qui auraient une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière ; la théorie de la relativité ne l'interdit pas en principe, si du moins cette vitesse reste toujours comprise entre c et l'infini : de telles particules devraient conserver toujours une vitesse supérieure à celle de la lumière et seraient difficilement observables ; elles se manifesteraient par des énergies négatives dans des interactions. L'existence des tachyons poserait des problèmes logiques, car alors l'effet pourrait précéder la cause, mais elle n'a pas été démontrée, malgré les recherches qui en ont été faites.

(par exemple), ou déjà mort (en fonction de la vitesse, qui détermine le facteur de dilatation du temps). En proposant son exemple, Paul Langevin suivait pas à pas, ou plutôt heure par heure, pour ainsi dire, le voyageur du Cosmos, en examinant le temps de son horloge et le comparant au temps du Terrien par échange de signaux lumineux (y compris en tenant compte du décalage de leur spectre par effet Doppler-Fizeau, prédit par la théorie d'Einstein)⁵⁷. De la sorte, Langevin montrait que les relations de la relativité restreinte sont conformes au sens commun nécessité par ce type de situation.

Le paradoxe, soulevé par Paul Painlevé⁵⁸ et par d'autres, était que le vieillissement n'était pas relatif, contrairement à ce que propose la théorie. Mais c'est que l'expérience de pensée proposée est plus complexe que la situation symétrique où l'on a deux systèmes de référence en mouvement l'un par rapport à l'autre. Ici, il y en a trois : la Terre, le vaisseau spatial dans son voyage aller, et dans son voyage de retour où la vitesse est inversée. Si l'on veut, l'inversion des vitesses du voyageur, au moment du retour, a nécessité une accélération (d'ailleurs calculable en principe), qui équivaut, eu égard aux mouvements uniformes des voyages d'aller et de retour, à introduire un repère absolu, qui correspond en fait à celui de la Terre.

Des expériences de «jumeaux» sans troisième référentiel du retour, mais avec possibilité de comparer les durées dans les deux repères, sont réalisées quotidiennement à des milliards (et plus) d'exemplaires, avec les particules quantiques élémentaires du rayonnement cosmique ou des accélérateurs de particules. Le temps de vie propre de ces particules (par exemple, une microseconde pour des «muons», produits dans la haute atmosphère ou dans des accélérateurs, qui se désintègrent en moyenne au bout de ce temps) est dilaté dans leur parcours par rapport au système de référence fixe du laboratoire par l'effet cinématique relativiste, comme on l'observe en les détectant au bout de distances parcourues bien plus grandes que ce qu'elles auraient jamais pu franchir autrement puisque, sans dilatation de leur temps propre, elles auraient dû être désintégrées depuis longtemps⁵⁹.

Concluons d'une phrase la leçon fondamentale de la théorie de la relativité restreinte concernant le concept de temps : c'est un temps physique, construit pour tenir compte de propriétés générales des phénomènes physi-

⁵⁷ Langevin [1911 a et b]. Paul Langevin (1872-1946), physicien français.

⁵⁸ Paul Painlevé (1863-1933), mathématicien français et homme politique.

⁵⁹ Leur durée de vie dans leur référentiel propre étant τ , elles n'auraient pu parcourir, à la vitesse quasiment de la lumière, que la distance $c \cdot \tau$, alors qu'elles parcourent une distance effective beaucoup plus grande pouvant aller jusqu'à, $\gamma \cdot c \cdot \tau$, leur durée de vie étant $\gamma \cdot \tau$ dans le référentiel du laboratoire (avec un facteur de dilatation γ très élevé).

ques que résumant le principe de relativité (pour les mouvements d'inertie), et la constance de la vitesse de la lumière indépendamment du mouvement de sa source, et il détermine, avec l'espace, construit symétriquement de même, une *cinématique* pour l'ensemble des phénomènes physiques dont la théorie dynamique est déterminée dans l'espace-temps relativiste de Minkowski, mais indépendamment de lui.

Le temps non uniforme de la relativité générale

Quant à la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui nous donne un nouveau moyen de comprendre les propriétés de l'Univers (théorie de la gravitation, elle permet de concevoir la cosmologie), elle a modifié, elle aussi, notre conception du temps physique, en établissant, *contre l'uniformité du temps postulée par Newton*, que *le temps ne s'écoule pas partout de la même façon*. En sorte que *le temps n'existe pas indépendamment des phénomènes*: ses propriétés sont *dictées*, au contraire, par les phénomènes, en l'occurrence ceux qui correspondent à la présence de champs de gravitation engendrés par des masses. Notamment, le temps s'écoule plus lentement dans les champs de gravitation très intenses, tels ceux qui règnent à la surface des corps célestes massifs, comme le Soleil. Même sur notre Terre, cet effet peut être ressenti : en bas d'une montagne les horloges battent moins vite qu'en altitude. De tels effets ont été constatés avec des horloges extrêmement précises comme les horloges atomiques. Cependant, si le temps s'écoule plus lentement dans les champs de gravitation intenses, les individus qui sont dans ces champs ne perçoivent pas sur eux-mêmes la différence d'écoulement du temps, puisque leur horloge biologique bat au même rythme que leur horloge physique.

Des phénomènes de gravitation à la réforme du temps de l'espace-temps

Einstein n'avait pas, au départ, en commençant son odyssee vers la théorie de la relativité générale, une volonté particulière de transformer le temps et l'espace, il voulait traiter de la théorie de la gravitation, dans la ligne qu'il venait d'ouvrir avec la relativité restreinte.

D'une part, il se posait la question de savoir comment la *théorie de la gravitation* (celle alors en vigueur étant la théorie de Newton) était transformée quand on lui appliquait la nouvelle cinématique des actions à vitesse

de propagation finie, et il se rendit compte que cela posait des problèmes. En effet, la chute des corps correspond à des mouvements accélérés, et la cinématique des mouvements rectilignes uniformes (ou d'inertie) ne lui est pas applicable, sinon par approximation, pour des mouvements très lents. Mais il lui vint alors à l'idée que, la chute des corps se faisant avec la même accélération à une hauteur donnée (selon la loi de Galilée), un champ de pesanteur uniforme équivalait localement à un mouvement uniformément accéléré. C'est ce qu'il appela le «principe d'équivalence».

D'un autre côté, Einstein se posait la question de savoir si au lieu de considérer des mouvements uniformes tels que ceux d'inertie, on ne pouvait pas envisager *des mouvements plus généraux, d'accélération quelconque*. En effet, le jugement d'uniformité d'un mouvement est relatif au point de vue que l'on adopte. Etant donné la variété des mouvements dans l'Univers, ce qui est uniforme pour nous ne l'est pas, vu d'un système en rotation par rapport à nous, par exemple. Le principe de relativité restreinte (pour les mouvements d'inertie) conduit à des invariances qui restent donc encore arbitraires, quand il faudrait considérer des invariances totalement indépendantes des états de mouvement quelconques. Il posa le *principe de relativité générale* dans cette idée.

Dans cette position du problème de la relativité générale et de la gravitation, le temps n'est pas mentionné. Il n'interviendrait, en fait, qu'au sein de l'espace-temps. Ayant adopté la formulation mathématique de Minkowski, Einstein se rendit compte que l'espace-temps, indépendant des corps et des phénomènes physiques, était encore trop proche des concepts absolus : l'espace-temps de la relativité restreinte était absolu, puisqu'il était indépendant des corps physiques. Il s'en aperçut quand il voulut traduire le problème de la généralisation du principe de relativité aux mouvements accélérés quelconques à l'aide, précisément, de la formulation de Minkowski.

L'espace-temps de la relativité restreinte repose sur une signification physique des coordonnées spatiales et du temps qui suppose les premières rigides, pour un espace euclidien, et le second régulier, aux intervalles toujours égaux (souvenons-nous de la définition tautologique de Newton: le temps, par sa nature, coule uniformément). Exprimer, comme se le proposait Einstein, la «covariance générale» par rapport à des transformations de coordonnées quelconques, exigeait de renoncer à ces restrictions, et d'accepter *a priori*, pour les quatre coordonnées et leurs transformées dans des systèmes quelconques, la forme la plus générale possible, laissant la possibilité que les corps se déforment, et donc admettre des espaces localement non-euclidiens et des durées élémentaires non universelles. Einstein disait que l'*espace-*

temps de référence, n'étant plus rigide, était un «mollusque de référence». Il fallait admettre que l'espace-temps n'est peut-être pas «plat» (ou «quasi euclidien»), mais «courbe» (non euclidien).

Son travail théorique sur les tenseurs et le calcul différentiel absolu le conduisit, après beaucoup d'efforts, à la solution du problème entrevu au départ : l'espace-temps est structuré par les champs de gravitation qu'il contient, et n'en est pas indépendant. Le *contenant* est affecté par le *contenu*. L'élément invariant de distance dans l'espace-temps n'est plus donné par une métrique unique et partout la même, mais par une métrique dont les coefficients varient en chaque point, et sont fonction du champ de pesanteur en ce point⁶⁰. La théorie de la relativité générale donne la relation entre le tenseur métrique et le tenseur d'énergie-impulsion qui correspond au champ de gravitation⁶¹.

Le temps est désormais lié indissolublement, non seulement à l'espace, mais aussi à la matière. Son rythme est celui des phénomènes. En particulier, le temps et l'espace n'existent pas vides de corps, ils ont la forme que leur donnent les champs de gravitation. Le temps nous est donné par les phénomènes, en l'occurrence, pour ce qui concerne la relativité générale, le phénomène de la gravitation.

5. La fuite du temps. En manière de conclusion...

Les autres déterminations scientifiques du temps.

Ce que tous ces développements des conceptions du temps physique nous ont appris, c'est que le temps est l'objet d'une élaboration par la pensée, pour rendre compte des phénomènes du monde dans lequel nous vivons, et en particulier de ces deux aspects que sont la permanence et le changement. On peut, dans ce sens, parler d'une certaine réalité, ou matérialité du temps : c'est une matérialité indirecte, mais dont attestent à leur manière les sciences qui se préoccupent de «chronologie» (la géochronologie, la biochronologie

⁶⁰ Dans l'espace-temps de la relativité générale, l'élément invariant, ds^2 , carré de l'élément de quadri-distance, en un point $(x$, de coordonnées x_μ , avec $\mu = 1, 2, 3, 4$), s'exprime comme une forme quadratique des quatre coordonnées d'un point d'espace-temps ($ds^2 = \Sigma g_{\mu\nu}(x) \cdot x_\mu x_\nu$), où chaque terme $x_\mu x_\nu$ possède un coefficient variable en chaque point, $g_{\mu\nu}(x)$: ces coefficients (huit sont indépendants) sont les composantes du «tenseur métrique», donné par le champ de gravitation en ce point.

⁶¹ Einstein [1989-1993]. Voir Paty [1993], chap. 5.

qui parle d'«horloges biologiques», la cosmochronologie, ...).

Et il faudrait, pour conclure, parler du temps tel qu'il est conçu, représenté, utilisé, dans les diverses sciences : en mathématiques (arithmétique), en physique dans d'autres domaines que ceux mentionnés, en astronomie, en géologie, en chimie, en biologie évolutionniste, en physiologie, en biologie moléculaire, en cosmologie, ..., pour ne parler que des sciences exactes.

On considérerait, par exemple, les rythmes des manifestations biologiques, leur caractère cyclique, périodique. Leur lien d'origine aux rythmes physiques, géologiques, astronomiques (marées, rotation de la Terre, ...), leur détermination par les mécanismes moléculaires (métabolismes), les horloges élémentaires de la cellule, couplées entre elles..., les rythmes codés génétiquement, mais changeant avec l'âge (vieillesse biologique)...

Les rythmes biologiques aux différents niveaux, de la cellule aux organes et à l'organisme tout entier, s'informent mutuellement et s'emboîtent les uns les autres, un peu comme les rouages d'une montre, en sorte qu'il en résulte le sens que notre système nerveux et notre cerveau nous donne du déroulement du temps. Ce temps est évidemment relié au temps de l'astronomie (jours et nuits, saisons, etc.), qui est celui de la physique, et qui a accompagné la formation des rythmes cellulaires et de ceux des organismes. C'est-à-dire qu'il y a une matérialité au départ de ce qui nous a amené à faire l'expérience du temps et à constituer le concept de temps.

Le temps neuronal et les constructions par l'entendement

Il faudrait parler aussi, bien sûr, du *temps neuronal*. La description objective de l'expérience du temps n'a-t-elle pas sa source, en dernière analyse, dans l'organisation du système nerveux central et dans les réseaux de neurones? Car cette expérience passe en premier lieu par les sensations et les transcriptions qui s'en font, à travers la perception, par les circuits neuronaux, et l'on sait trouver dans telle zone du système nerveux central le lieu de tel type de perception spatiale, et sans doute aussi temporelle. De notre «sens du temps» participent ainsi les cellules et les arrangements de molécules qui les constituent, et l'on conçoit une intégration à l'organisme entier. Je peux sourire sans mal à un tel schéma d'ensemble, de même que j'admets ce que nous disent les neurophysiologistes des zones de localisation des fonctions spatiales dans le cerveau.

Il reste que cela ne se rapporte qu'à l'espace ou au temps «physiologiques», reconstitués à partir des sensations et des perceptions. Nous savons

que l'espace géométrique, par exemple, ne nous est pas donné de cette manière, qu'il est distinct de l'espace physiologique, qu'il est construit par les opérations complexes et abstraites de l'entendement (Poincaré a écrit voici un siècle de riches réflexions sur ce sujet⁶²). De même, le temps construit de la manière que nous avons vue se distingue manifestement du temps perçu et éprouvé dans les sensations. Il n'est pas donné naturellement dans les sensations et dans la perception, même s'il nous vient des phénomènes, et c'est, au contraire, au moyen de sa construction abstraite par l'entendement que nous parvenons à comprendre quelque chose de ces phénomènes.

Fuite du temps, usure des choses...

Un autre problème est celui du vieillissement, qui est inscrit dans les cellules, comme le second principe de la thermodynamique est inscrit dans les ensembles complexes de molécules. Nous en faisons abstraction en reconstruisant le temps des phénomènes de la physique des systèmes simples (en supposant le temps réversible, ponctuel avec l'instant, linéaire à l'image de la ligne droite, homogène). Mais le temps que nous appelons irréversible lui-même est aussi un temps rationnel, construit par la raison, dépouillé des contenus sensibles associés à notre expérience du temps. C'est une construction culturelle, en fonction des phénomènes considérés comme les plus fondamentaux.

J'évoquerai d'un mot, pour terminer, le temps de la thermodynamique, qui apporte, à notre conception du temps, quelque chose de très différent du concept de temps dont nous avons parlé, et dont les théories que nous avons rappelées ne se préoccupent pas : *l'irréversibilité*. Le *deuxième principe de la thermodynamique*⁶³, fondé sur un large corpus d'observations et d'expérimentations, stipule que les transformations physiques sont irréversibles. Un mouvement peut se transformer en chaleur, mais de la chaleur ne peut engendrer du travail sans perte d'énergie. Un système physique complexe ne peut spontanément revenir à l'un des états qu'il occupait antérieurement. Mais cela ne veut pas dire qu'il y ait contradiction entre cette propriété et celles dont nous avons parlé, si l'irréversibilité résulte d'autres conditions, telles que celles auxquelles sont soumis de grands ensemble statistiques de molécules ou de corps physiques.

⁶² Poincaré [1902].

⁶³ La connaissance de ce principe est due aux travaux, notamment, de Sadi Carnot (1796-1832), physicien français, William Thomson Lord Kelvin (1824-1907), physicien britannique, Rudolf Clausius (1822-1888), physicien allemand.

Comment raccorder l'irréversibilité indiquée par ce principe avec la réversibilité de la mécanique ou de la relativité ? Les grands thermodynamiciens qu'étaient James Clerk Maxwell ou Ludwig Boltzmann⁶⁴ ont analysé les systèmes physiques (par exemple, gazeux) en termes de leurs constituants microscopiques : les phénomènes pour lesquels on constate une irréversibilité sont des phénomènes macroscopiques, qui résultent du mouvement d'un grand nombre d'atomes (à l'époque, l'explication était osée, car l'idée d'atomes n'était pas acceptée par tous).

Considérons, par exemple, une goutte d'encre que l'on place avec une pipette dans de l'eau. Initialement toutes les molécules d'encre sont groupées au centre du verre, là où elle a été déposée ; la situation physique est unique. Puis, après la diffusion des molécules, la dispersion de l'encre peut correspondre à un très grand nombre de configurations différentes. La probabilité que l'on trouve l'encre regroupée en une goutte est infime, alors que la probabilité que l'on trouve les molécules d'encre dispersées dans l'eau est élevée, et tel est en effet le résultat de l'observation. Certes, il n'est pas exclu que l'encre puisse se regrouper, mais le phénomène est très improbable, comme on peut s'en rendre compte en comptant les configurations disponibles et la probabilité de n'avoir que l'une d'entre elles. Henri Poincaré proposait, pour illustrer cette situation, le cas d'un cycliste dont un pneu est crevé, attendant au bord de la route : s'il attend suffisamment longtemps (très très longtemps !) sans rien faire, son pneu pourra se regonfler par le seul jeu du mouvement des molécules d'air et il pourra repartir sans se salir les mains...⁶⁵. On peut considérer que, selon cette interprétation par la mécanique statistique du deuxième principe de la thermodynamique, l'on a une modification de notre conception de l'impossibilité de revenir à un *état* passé (mais non pas à un *temps* antérieur). Ce retour ne serait pas strictement impossible, mais seulement hautement improbable.

Références bibliographiques

Aristote [Phys]. *Physique*, livre IV.

Augustin, Saint [Conf.]. *Confessions*, éd. P. de la Briolle, Belles Lettres, Paris, 1927. (*Confessions*, X, iv-xxxi, sur l'analyse du temps).

Bergson, Henri [1922]. *Durée et simultanéité : à propos de la théorie d'Einstein*, Alcan, Paris, 1922 ; 2^{ème} éd. augm. d'un avant-propos et de

⁶⁴ Ludwig Boltzmann (1844-1906), physicien autrichien.

⁶⁵ Poincaré [1902].

- trois appendices, 1923 ; 1925; 1929.
- [1959]. *Oeuvres*, Textes annotés par André Robinet, édition du centenaire, Presses Universitaires de France, Paris, 1959; 2^{ème} éd., 1963.
- [1972]. *Mélanges*, publié par André Robinet, Presses Universitaires de France, Paris, 1972.
- Capek, Milic [1976]. *The concepts of space and time. Their structure and their development*, D. Reidel, Dordrecht, 1976.
- Cassirer, Ernst [1923]. *Substance and function and Einstein's theory of relativity*. Trad. angl. par William Curtis Swabey and Mary Collins Swabey, Open Court, Chicago, 1923 ; Dover, New York, 1953. (Originaux en allemand : *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Bruno Cassirer, Berlin, 1910. *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie*, Bruno Cassirer, Berlin, 1921.
- Crombie, A.C. [1952]. *Augustine to Galileo. The history of science. 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.
- Descartes, René [vers 1633]. *Le monde ou Traité de la lumière*, première éd. posth., Le Gras, Paris, 1664 ; édité par Clerselier, Paris, 1677, republié in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 11, p. 1-118.
- [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.
- [1641]. *Meditationes de Prima philosophia*, 1^{ère} éd., Michel Soly, 1641 ; 2^{ème} éd. augm., Louis Elzevier, Amsterdam, 1642; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 7, p. 1-612. Trad. en français (1647), *Méditations*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 9, p. 1-254.
- [1644]. *Principia philosophiae*, 1^{ère} éd. princeps, Louis Elzevier, Amsterdam, 1644 ; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 8, p. 1-353. Trad. en français (1647), *Principes de la philosophie*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 9, p. 1-362.
- [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1^{ère} éd., 1896-1913) ; nouvelle édition révisée, Vrin, Paris, 1964-1974; ré-éd., 1996. (AT).
- Eddington, Arthur [1920]. *Space, time and gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1920. Trad. fr. par M. Rossignol, *Espace, temps et gravitation*, Paris, 1920.
- Einstein, Albert, Lorentz, Hendryk A., Minkowski, Hermann, Weyl, Hermann [1923]. *The principle of relativity*, with notes by Arnold

- Sommerfeld, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923 ; rééd., Dover, New York, 1952.
- Einstein, Albert [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, éd. et trad. par Françoise Balibar *et al.*, Seuil, Paris, 6 vols., CNRS/Seuil, 1989-1993 (en part., vol. 2 et 3, *Relativités 1 et 2*, 1993).
- 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.
- Gindikin, Semyon Grigorevich [2000]. *Horloges, pendules et mécanique céleste. Mathématiciens et physiciens de la Renaissance à nos jours* (ouvrage traduit du Russe par Jean-Michel Kantor), deuxième édition, Cassini, Paris, 2000, p. 1-9.
- Grünbaum, Adolf [1963]. *Philosophical problems of space and time*, Knopf, New York, 1963. Second, enlarged, ed., Reidel, Dordrecht, 1973.
- Hawking, Stephen [1988]. *A Concise History of Time*. Trad. fr. par Isabelle Naddeo-Souriau, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, Paris, 1989.
- Hawking, Stephen and Penrose, Roger [1996]. *The Nature of Space and Time*, Princeton University Press, Princeton, 1996. Trad. fr par F. Balibar, *La nature de l'espace et du temps*, Présentation par Marc Lachièze-Rey, Gallimard, 1997.
- Hinkfuss, Ian [1975]. *The Existence of Space and Time*, Clarendon Press, Oxford, 1975.
- Horwich, Paul [1987]. *Assymetries in Time. Problems in the Philosophy of Science*, MIT Press, Cambridge (Mass), 1987.
- Houzel, Christian, et Paty, Michel [1997]. Poincaré, Henri (1854-1912), *Encyclopædia Universalis* (Version CD-Rom), 1997. Repris dans *Encyclopædia Universalis, Dictionnaire de l'Astronomie*, Encyclopædia Universalis/ Albin Michel, Paris, 1999, p. 696-706.
- Hoyle, Fred [1972]. *From Stonehenge to Modern Cosmology*, Freeman, San Francisco, 1972.
- Huygens, Christiaan [1673]. *Horologium oscillatorum, sive de motu pendulorum ad horologia adaptato demonstrationes geometrica* (*Preuves géométriques relatives au mouvement des pendules adaptés aux horloges*), 1673 ; in Huygens [1888-1950] ; trad. fr. par J. Peyroux, *L'Horloge oscillante*, Blanchard, Paris, 1981.
- [1888-1950]. *Oeuvres complètes*, 22 vols., Société Hollandaise des Sciences/Martinus Nijhoff, Amsterdam/La Haye, 1888-1950.
- Kant, Immanuel [1787]. *Kritik der reinen Vernunft*, J.F. Hartknoch, Riga, 1781; 2^e 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.
- Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994 ; Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996.
- Langevin, Paul [1911a]. L'évolution de l'espace et du temps, *Scientia* (Bologna) 10, 1911, 31-54 (conférence au Congrès de philosophie de Bologne, 1911). Repris in Langevin 1923, p. 265-300.
- [1911b]. Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne, *Bulletin de la Société française de philosophie*, 12, 1911, 1-46. Repris in Langevin [1923], p. 301-344.
- [1923]. *La physique depuis vingt ans*, Doin, Paris, 1923.
- Leibniz, Gottfried, Wilhem [1715-1716]. *Correspondance Leibniz-Clarke, présentée d'après les manuscrits...*, par André Robinet, Presses Universitaires de France, Paris, 1954.
- Locke, John [1690]. *An Essay concerning human understanding*, London, 1690.
- Mach, Ernst [1883]. *Die Mechanik*. Trad. fr. par E. Bertrand, *La mécanique*, Paris, Hermann, 1904.
- Mach, Ernst [1898]. *Popular lectures*, Tr. de l'Allemand par T.J. McCormack, Chicago, Open Court, 1898.
- Mallarmé, Stéphane [1885]. Le vierge, le vivace et le bel aujourd'hui, *La Revue indépendante*, mars 1885 ; in S. M., *Poésies*, 1887 ; in S. M., *Oeuvres complètes*, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, Paris, 1945 ; ré-éd., 1989, p. 67-68.
- Meyerson, Emile [1908]. *Identité et réalité*, Alcan, Paris, 1908. 5 ème éd., Vrin, Paris, 1951.
- Minkowski, Hermann [1908]. Raum und Zeit, *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 104-111. Trad. angl., Space and time, in Einstein et al. [1923], p. 73- 91.
- 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 University Press, Cambridge, 1972. 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. Trad. française par Mme du Chastelet, *Les Principes mathématiques de la philosophie naturelle de M. Newton*, 2 vols., Paris, 1756 et 1759.
- Newton-Smith, W. H. [1980]. *The Structure of Time*, Routledge and Kegan

- Paul, London, 1980 ; 1984.
- Paty, Michel [1993]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.
- [1994a]. Sur l'histoire du problème du temps : le temps physique et les phénomènes, in Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994, p. 21-58 ; 2^e éd., 1995 ; Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.
- [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.
- [1995]. Newton, Isaac (1642-1727), *Encyclopædia Universalis*, vol. 12, 1995, p. 315-317. Repris dans *Encyclopædia Universalis, Dictionnaire des philosophes*, Encyclopædia Universalis/ Albin Michel, Paris, 1998, p. 1111-1118 ; repris dans *Encyclopædia Universalis, Dictionnaire de l'Astronomie*, Encyclopædia Universalis/ Albin Michel, Paris, 1999, p. 642-650.
- [1996a]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1994*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
- [1996b]. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470. R
- [1996c]. Galilée et la mathématisation du mouvement, *Passages*, n°76, avril-mai 1996, 49-53.
- [1997a]. *Albert Einstein, ou la création scientifique du monde*, Collection Figures du savoir, Belles Lettres, Paris, 1997.
- [1997b]. Histoire rapide de la vitesse (le concept physique), in *La vitesse. Actes des 8^{es} Entretiens de la Villette*, Centre National de Documentation Pédagogique, Paris, 1997, p. 15-31.
- [1997c]. «Mathesis universalis» e inteligibilidad en Descartes, Trad. en español por M. C. Bustamente, in Albis, V. et al. (eds.), *Memorias del Seminario en conmemoración de los 400 años del nacimiento de René Descartes*, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Memorias, n°9, 1997, p. 135-170. Original en français : «Mathesis universalis» et intelligibilité chez Descartes, à paraître
- [1998a]. *D'Alembert ou la raison physico-mathématique au siècle des*

- Lumières*, Collection Figures du savoir, Les Belles Lettres, Paris, 1998, 207 p.
- [1998b]. La philosophie et la physique, in Jean-François Mattéi (éd.), *Le Discours philosophique*, volume 4 de l'*Encyclopédie philosophique universelle*, Presses Universitaires de France, Paris, 1998, chap. 123, p. 2104-2122.
- [1998c]. Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps in Flament, Dominique (éd.), *Dimension, dimensions I*, Série Documents de travail, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 1998, p. 87-112.
- [1999h]. Les trois stades du principe de relativité, *Revue des questions scientifiques* (Namur, Be), 170 (n°2), 1999, 103-150. Republié dans *Les Relativités*, numéro spécial de la *Revue des questions scientifiques*, 2000, 103-150.
- [2000]. Einstein et la pensée de la matière, in Monnoyeur, Françoise (éd.), *La matière des physiciens et des chimistes*, Le Livre de poche, Hachette, Paris, 2000, p. 213-252.
- [2001a]. Intelligibilité et historicité (Science, rationalité, histoire), in Saldaña, J. J. (ed.), *Science and Cultural Diversity: Filling in the History of Science*, Mexico, 2001.
- [2001b]. D'Alembert, la science newtonienne et l'héritage cartésien, *Corpus* (Paris), à paraître.
- Piètre, Bernard [1994]. *Philosophie et science du temps*, Coll. Que Sais-je ?, Presses Universitaires de France, Paris, 1994.
- Plotin [Enn]. *Ennéades* (III, 7-13, sur l'analyse du temps).
- Poincaré, Henri [1898]. La mesure du temps, *Revue de métaphysique et de morale* 6, 1898, 1-13. Egalement in Poincaré [1905], chapitre 5, (éd. 1970, p. 41-54).
- [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902 ; 1968.
- [1905]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905 ; 1970.
- [1912]. L'espace et le temps, *Scientia*, 12 ème année, vol. XXV, 1912, 159-170 [Conférence faite le 4 mai 1912 à l'Université de Londres]. Egalement in Poincaré [1913] Š, éd. 1963, p. 97-109.
- [1913]. *Dernières pensées*, Š Flammarion, Paris, 1913 ; réed. 1963.
- Pomian, Krzysztof [1984]. *L'ordre du temps*, Gallimard, Paris, 1984.
- Proust, Marcel [1925]. *Albertine disparue*, édition posthume, 2 vols., Gallimard, Paris, 1925 ; in Proust, M., *A la recherche du temps perdu*, 4 vols., Bibl. de la Pléiade, Gallimard, Paris, 1954, (vol. 4).
- Reichenbach, Hans [1928]. *Space and Time*. Transl. (from the German,

- Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, 1928) by Maria Reichenbach and John Freund, with introductory remarks by Rudolf Carnap, Dover Publications, New York.
- Relativités [2000]. *Les Relativités*, numéro spécial de la *Revue des questions scientifiques* (Namur, Be), n° spécial, 2000.
- Ricœur, Paul *et al.* [1978]. *Le temps et les philosophies*, Payot/Presses de l'Unesco, Paris, 1978.
- Ricœur, Paul [1983-1985]. *Temps et récit*, 3 vols., Seuil, Paris, 1983-1985 ; ré-éd., 1991.
- Rosenfeld, Léon [1979]. *Selected papers*, edited by Robert S. Cohen and John Stachel, Reidel, Dordrecht, 1979.
- Russell, Bertrand [1922]. *Our knowledge of the external world*, Allen and Unwin, London, 1922 (En part., chapt. 6 : The Problem of Infinity Considered Historically).
- Schlick, Moritz [1917]. *Raum und Zeit in der Gegenwärtigen Physik. Zu Einführung in das Verständnis der Allgemeinen Relativitätstheorie*, Berlin, 1917; autres éd. rev. et augm., 1919, 1920, 1922. Trad. angl. (sur la 3^{ème} éd. allemande) par Henry L. Brose, *Space and time in contemporary physics. An introduction to the theory of relativity and gravitation*, Clarendon Press, Oxford, 1920; ré-éd., New-York, 1963. Repris, avec les modifications de la 4^{ème} éd. allemande traduites par Peter Heath, dans Schlick [1979], vol. 1, p. 207-269.
- [1979]. *Philosophical papers*, edited by Henk L. Mulder and Barbara F. B. van de Velde-Schlick, translated by Peter Heath, Wilfrid Sellars, Herbert Feigl and May Brodbeck, 2 vols., Reidel, Dordrecht, 1979.
- Schrödinger, Erwin [1950]. *Space-time structure*, Cambridge University Press, Cambridge, 1950; repr. with corrections, 1960; 1988.
- Smart, J. J. C. (ed.) [1964]. *Problems of Space and Time, Readings selected*, MacMillan, New York, 1964 ; 1973.
- Souriau, Michel [1937]. *Le temps*, Alcan, Paris, 1937.
- Suppes, Patrick (ed.) [1983]. *Space, time and geometry*, Reidel, Dordrecht, 1983.
- Wahl, Jean [1920]. *Du rôle de l'idée de l'instant dans la philosophie de Descartes*, Thèse complémentaire de Doctorat ès-Lettres, Paris, 1920. Rééd. avec une introduction par Frédéric Worms, Descartes et Cie, Paris, 1994.
- Weyl, Hermann [1918]. *Raum, Zeit, Materie*, Berlin, 1918 ; 4^{ème} éd., augm., 1921. Trad. fr. sur la 4^{ème} éd. allede., par Gustave Juvet et Robert Leroy, *Temps, espace, matière. Leçons sur la théorie de la relativité générale*,

- Blanchard, Paris, 1922 ; Paris, 1979.
- Whitehead, Alfred North [1919]. *An Enquiry concerning the Principles of Natural Knowledge*, 1919 ; 2 è éd., 1925 ; 1982.
- Withrow, G. J. [1961]. *The Natural Philosophy of Time*, Nelson, 1961 ; Second ed, Oxford University Press, Oxford, 1980.