Zeitschrift: Studia philosophica : Schweizerische Zeitschrift für Philosophie = Revue suisse de philosophie = Rivista svizzera della filosofia = Swiss journal of philosophy

Herausgeber: Schweizerische Philosophische Gesellschaft

Band: 10 (1950)

Artikel: Les conditions physiques et la notion de temps

Autor: Mercier, André

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-883441

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les conditions physiques et la notion de temps *

par André Mercier, Berne.

Sommaire: 1. Avant-propos. 2. Déterminabilité et complémentarité; relativité et canonicité. Introduction au problème de l'antimorphisme. 3. Le problème particulier de la géométrie, le rôle de la gravitation, et le problème général, celui de l'espace-temps. 4. L'antinomie de la relativité et de la canonicité. 5. Le problème de l'espace, donnée première? 6. La canonicité, germe du statistique et du quantique. 7. La complémentarité de Bohr et l'antimorphisme qui s'en distingue. 8. Divers aspects de la notion de temps en physique. 9. Conséquences pour les sciences s'ordonnant à la suite de la physique et pour la classification des sciences en général.

1. *Avant-propos*

L'intérêt grandissant qui se manifeste parmi les savants philosophes pour les choses de la physique quantique est comparable à celui qui eut trait autrefois à la théorie de la relativité. C'est un développement naturel; il est seulement frappant qu'il soit né beaucoup plus tard que l'intérêt pour la physique relativiste qui est la cadette de la physique quantique. Il ne faut pas trop s'en étonner, car quand on compare les complications presque inextricables dont la théorie quantique a dû peu à peu se détacher à la ligne si vite tracée par le développement relativiste, ce dernier devait bien plus tôt que la première nourrir la spéculation philosophique. Mais aujourd'hui où l'on possède pour la description des phénomènes quantiques un appareil théorique assez complet pour être soumis à une analyse axiomatique, il est temps qu'on s'y arrête pour bien connaître ses implications jusque dans les domaines les plus profonds des constructions mentales. On peut l'étudier pour soi; on peut aussi le comparer à d'autres appareils théoriques. En particulier, lorsqu'on entreprend une

* Le contenu de cet article a fait l'objet d'un exposé à la Société suisse de Logique et de Philosophie des Sciences.

analyse parallèle de cet appareil et de celui de la relativité, on découvre qu'il y a entre eux une communauté de but, car ils sont censés conduire à l'explication des mêmes choses; mais en revanche il existe entre eux une distinction de principe qui va si loin qu'on est tenté de la taxer d'antinomique.

C'est surtout à cette situation antinomique que sera consacrée la présente étude. Jusqu'à ce jour, on n'a pas relevé d'antinomie dans un domaine aussi positif que celui de la physique. Kant en voyait surgir au cours de la critique de la raison pure, les mathématiciens en ont construit jusqu'à amuser les profanes. On pouvait croire qu'elles étaient confinées au champ des préoccupations logico-linguistiques. Mais il paraît qu'on emploie aussi ce même terme en jurisprudence ou en théologie, lorsque l'application de deux principes réputés différents produit un conflit quelque part. C'est dans ce sens aussi qu'on voit surgir en physique une difficulté considérable.

Expliquons-nous dès l'abord en quelques mots. Ce qu'on appelle, d'une part, *relativité* est l'aspect général que prennent certains principes dans l'emploi du temps et de l'espace[1]. On appelle, d'autre part, *canonicité* l'aspect d'autres principes que l'on construit tout différemment[2]. Ces deux aspects sont les termes de notre anti-

---

[1] Par relativité, il faudra comprendre ici constamment relativité de l'espace et du temps.

[2] Il faudra comprendre dans cette étude, sous le nom de canonicité, autant le caractère de la mécanique et des théories qui s'y rattachent de pouvoir conjuguer d'une manière déterminée un moment à chaque coordonnée, que les conséquences considérables de cette conjugaison, bref tout ce qui est résumé ou compris implicitement dans des équations du type canonique, dont la forme la plus générale s'obtient, au moyen de ce qu'on appelle en physique mathématique la parenthèse de Poisson $[\theta, H]$, comme suit:

$$\dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial t} + [\theta, H].$$

Exemples de grandeurs conjuguées: *lieu* (coordonnées) et *quantité de mouvement* (moment conjugué); *angle* (coord.) et *moment de rotation* (conjugué); la paire des grandeurs conjuguées (elles ne portent pas de nom!) tirées du potentiel électromagnétique d'une onde lumineuse au moyen des composantes monochromatiques des séries de Fourier (voir p. ex. W. Heitler, The Quantum Theory of Radiation, Oxford 1936, chap. I, § 6). A l'origine, moment désignait une grandeur se référant à un point, un axe ou un plan; par exemple, la quantité de mouvement mv_x (m = masse, v_x = vitesse dans

nomie. Le premier étant beaucoup mieux connu que le second, c'est à décrire ce dernier que devraient s'attacher particulièrement les spécialistes. Quelqu'un fera-t-il un reproche à qui cherchera même à lever l'antinomie ? J'inventerai l'expression d'antimorphisme pour caractériser la solution proposée.

C'est en analysant ces questions que j'ai été amené à formuler des problèmes qui sortent du cadre de la physique proprement dite, et à entrevoir la forme à donner à leur solution. Le sens — je devrais dire les divers sens — qu'y prend la notion de temps fait jouer à ce dernier un rôle singulier. Cette étude est donc une recherche sur le temps; cependant, elle sera loin d'être exhaustive, car les problèmes posés par le temps dans le cadre des phénomènes réversibles retiendront à eux seuls le plus longtemps notre attention.

Mais, après une longue dissertation, je ne pourrai résister au désir d'ouvrir quelques fenêtres sur des aspects ultérieurs. Car il semble qu'à la lumière des connaissances acquises, ce soit jusqu'au problème de la classification des sciences qu'il faille poser à nouveau suivant une ligne divergeant nettement de la classification positiviste.

2. *Déterminabilité et complémentarité; relativité et canonicité*
Introduction au problème de l'antimorphisme

Ce sont les physiciens, en particulier Planck, qui ont reposé le problème du libre arbitre et du déterminisme depuis qu'on a vu apparaître la théorie des quanta. Déjà avant qu'Heisenberg ait énoncé la relation d'incertitude, on pouvait se demander si les énoncés de ce qu'on appelle aujourd'hui l'ancienne théorie des quanta n'étaient pas aptes à donner à cet antique problème un aspect nouveau, sinon une solution.

Depuis que la relation d'incertitude a été formulée, les philosophes eux-mêmes ont commencé à mêler la physique au libre

---

la direction x) se réfère au plan de coordonnée qui est perpendiculaire à x, ou bien le moment de rotation se réfère à l'axe autour duquel on mesure l'angle (la coordonnée). Cependant, dans l'expression de moment «conjugué», cette référence particulière s'évanouit pour faire place à une référence d'un ordre plus général qui est l'un des caractères de la canonicité.

Voir le § 4 pour des commentaires d'ordre général plus amples.

arbitre et l'on peut craindre que ce qui a été dit sur ce sujet repose en grande partie sur des malentendus.

C'est Niels Bohr qui a donné au problème, posé à la physique non seulement par la relation d'incertitude mais aussi par la dualité des ondes-corpuscules, la profondeur qu'il a aujourd'hui, et c'est lui qui a sauvé les discussions d'une méprise — qui les menace encore, d'ailleurs — en inventant cette expression admirable qu'est la complémentarité pour désigner une notion devenue nécessaire à la compréhension de la physique moderne.

Grâce à la complémentarité, il est devenu clair que l'incertitude selon Heisenberg ne détruit pas l'existence d'une causalité, que le déterminisme inhérent à la physique classique et connu sous le nom de déterminisme de Laplace a seulement été remplacé par un autre déterminisme, conditionnel si l'on veut, mais que l'idée directrice sans laquelle il n'y aurait pas de science physique, l'idée de prévisibilité, est restée inébranlée. C'est seulement le type de prévisions possibles qui est modifié; la prévision classique, totale et complète dans *son* exactitude étant remplacée par une prévision probabiliste quantique, incomplète dans *son* exactitude. La nouvelle prévision a la même propriété d'exactitude parce que, comme pour l'ancienne, elle ressort du calcul des solutions d'équations différentielles[3].

C'est parce qu'on a dit quelquefois indétermination au lieu d'incertitude, qu'on a cru devoir conclure à l'indéterminisme. Il n'en est rien.

Pour faire les prévisions, la théorie des quanta calcule certaines probabilités qu'on appelle en termes techniques des espérances mathématiques. Le mot sonne bizarrement et il serait bien désirable qu'une autorité traduisît directement l'expression anglaise

---

[3] Même dans un ouvrage aussi remarquable que «Les fondements mathématiques de la mécanique quantique» de J. von Neumann (trad. française par Al. Proca, Paris 1947), il est question d'un «principe de causalité» de la mécanique classique, alors qu'il faudrait dire déterminisme laplacien. Il s'ensuit une méprise déplorable, déterminant l'emploi déplacé de l'adjectif acausal.

Niels Bohr, dans son magistral exposé au tricentenaire de Newton (Newton Tercentenary Celebrations, The Royal Society, Cambridge Univ. Press 1947) le résume dans la phrase lapidaire que voici: "Truly, the view-point of complementarity may be said to present a rational generalization of the very ideal of causality."

ou allemande et dise par exemple: valeur d'expectation ou expectation tout court.

Ajoutons que l'interprétation probabiliste diffère elle-même de celle du calcul des probabilités dans lequel la constatation ou mesure des grandeurs aléatoires peut se faire dans n'importe quel ordre. Comme l'explique Louis de Broglie dans un excellent exposé[4], le roi de cœur d'un jeu de cartes ordinaire (cartes à notre échelle) est toujours un roi de cœur, quelle que soit la manière dont se produisent les chances que l'on a de le tirer du jeu, tandis que dans un jeu de cartes «microphysique», aucune d'elles n'est a priori un roi de cœur et même, quand on constate successivement d'une carte qu'elle a les propriétés roi et cœur (ou cœur et roi), on ne peut pas dire nécessairement que ce soit un roi de cœur.

Ce qu'on ne peut pas faire, c'est la détermination expérimentale simultanée et exacte de *certaines paires* de propriétés physiques («roi» et «cœur»). Aussi est-ce une question importante de savoir quelles sont les propriétés simultanées $Q_1, Q_2, Q_3 \ldots$ ou $P_1, P_2, P_3 \ldots$ d'un objet physique, alors que par exemple Q_1 et P_1 ne sont pas simultanés, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les mesurer ensemble avec certitude. Mais rien n'empêche théoriquement de déterminer Q_1 tout seul avec une précision que seuls les moyens techniques limitent comme ils le faisaient déjà au temps des interprétations classiques.

L'incertitude persiste entre les partenaires d'une paire de grandeurs non simultanées. La relation d'incertitude par elle-même assure que les caractères d'onde et les caractères de corpuscule d'un seul et même objet physique n'entrent jamais en collision; ou bien c'est son caractère ondulatoire, ou bien c'est son caractère corpusculaire qui se manifeste. Il y a donc toujours deux choses qui se complètent[5]. Cette complémentarité est dans la dualité, dans l'incertitude, dans la non-simultanéité. Elle est même si l'on veut dans l'antagonisme entre la causalité et la tentative quantique d'une description de forme classique au sens d'une évolution spatio-temporelle[6].

---

[4] Revue scientifique, *87*, p. 259, 1948.

[5] Voir L. de Broglie, La physique et les quanta (Paris 1937, p. 241).

[6] Voir W. Heisenberg, Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie (Leipzig 1930, p. 48 ss.).

A vouloir persister dans des interprétations valables seulement dans des théories antérieures, on risque sa foi dans l'efficacité de tout édifice nouveau. Il faut savoir se plier aux interprétations exigées par les nouvelles théories pourvu que ces théories soient justes, ce qui signifie qu'elles rendent compte d'une expérience déjà faite ou soient vérifiées par l'expérience ultérieure, et en même temps, ce qui paraît difficile à beaucoup de gens, reconnaître le provisoire, les bornes des interprétations anciennes. Il en a été de même dans le domaine de la relativité où des penseurs ne pouvaient se faire à l'idée que la relativité galiléenne est provisoire et d'application bornée. Qu'on imagine, par comparaison, la difficulté des savants s'accrochant aux vues aristotéliciennes à l'époque où celles de Galilée et Newton s'imposèrent.

J'avais besoin de cette introduction pour rappeler que la causalité n'est pas bannie de la physique. Or, qui dit causalité implique suite et je ne vois guère d'autre moyen d'ordonner la suite qu'au cours du «temps». C'est d'ailleurs un trait fondamental de la théorie des quanta que de déterminer une évolution temporelle des systèmes, en donnant à la notion de temps une primauté toute spéciale. Or, la théorie, à peine plus récente, de la relativité restreinte a détruit les espoirs de ceux qui voulaient imposer l'idée d'un temps absolu. Un conflit, dira-t-on, doit dès lors surgir s'il y avait identité entre la primauté accordée au temps par la physique quantique et l'absolu que la relativité interdit de lui attribuer.

C'est là peut-être que se trouve l'origine de grandes difficultés dans lesquelles se débat la physique contemporaine. Je me contenterai d'attirer l'attention sur le fait que des problèmes importants se posent à ce sujet dans l'épistémologie de la physique et j'essaierai de donner une solution en proposant, à l'exemple de la complémentarité de Bohr, de reconnaître dans la physique actuelle ce que j'appelle un *antimorphisme* séparant des choses distinctes sans les rendre contradictoires.

Il est très remarquable de trouver déjà dans la mécanique classique des indices de cet état de choses. Plus on avance dans son étude, plus on est étonné de voir quelles puissances sont cachées dans cette discipline. Pour apercevoir qu'elle possédait le concept de relativité, il fallut qu'on l'accusât de ne pas le traiter correctement. Or à côté de la relativité, la mécanique possède un autre concept, dont l'importance n'a pas encore été suffisamment re-

connue dans les cercles philosophiques, celui de la *canonicité*. La relativité et la canonicité sont à l'origine de ce conflit apparent que je tenterai de résoudre par l'antimorphisme, car c'est la canonicité qui est à l'origine du quantique, de l'incertitude, de la non-simultanéité des paires P, Q de grandeurs physiques conjuguées, et c'est la relativité qui est à l'origine de l'ondulatoire par opposition au corpusculaire. D'où l'importance des concepts de relativité et de canonicité et de leur antimorphisme pour une compréhension plus satisfaisante encore d'une physique où règne déjà la complémentarité.

3. *Le problème particulier de la géométrie, le rôle de la gravitation et le problème général, celui de l'espace-temps*

Le problème de cosmologie, celui qui a trait à la structure géométrique de l'Univers en rapport avec la gravitation et qu'Einstein a énoncé comme étant la détermination d'une géométrie riemanienne quadri-dimensionnelle, ce problème que j'appelle géométrique et que je cite en premier lieu, on le pose en général en dernier parmi les problèmes d'ordre géométrique. En effet, dans l'ordre habituel, on introduit d'abord l'espace-temps pour remplacer l'espace newtonien où règne un temps absolu. L'espace-temps est un continuum pseudo-euclidien à quatre dimensions et les transformations qui s'y produisent caractérisent ce qu'on appelle la relativité restreinte. Mais l'introduction de l'espace-temps ne peut se faire que si, en même temps, la gravitation se trouve exclue des considérations.

En énonçant le principe dit d'équivalence qui conduit à l'introduction du tenseur métrique et qui pose le problème de savoir quel est l'espace-temps particulier de structure riemanienne qui convient à une répartition donnée de masse gravifique, on peut avoir l'impression de réaliser une généralisation allant véritablement du plus restreint au plus général. C'est ainsi tout au moins que ce problème s'est présenté dans l'ordre historique de la théorie de relativité où il a été posé en dernier. Néanmoins, la généralisation qu'on pratique là ne me paraît pas avoir le degré d'évidence

qu'on lui attribuait à l'époque où elle a été annoncée. Comme cela s'était passé autrefois avec les principes utilisés par Galilée, l'adoption du principe d'équivalence, combiné, il est vrai, avec celui de covariance, a tout de suite donné l'impression que le procédé le plus général de traiter des questions physiques avait été découvert.

En réalité, la généralisation n'est contenue que dans la covariance et la combinaison avec l'autre principe n'avait pas d'autre but que de rétablir la gravitation. En soi, la covariance est toujours possible quand on a déjà l'espace-temps, et toute la relativité généralisée a tourné autour du phénomène de la gravitation, jusqu'au jour où l'idée d'une théorie unitaire est née, suscitant des tentatives de prolongement géométrique qui n'ont pas enthousiasmé grand monde.

L'attitude un peu bougonne que j'adopte envers la relativité généralisée est faite pour les besoins de ma cause actuelle, et on ne doit pas y voir plus qu'elle ne comporte. Elle nous met en garde contre la tentation d'hypostasier la notion de relativité. Le procédé de relativité a tout mon respect et je lui reconnais force de succès. Cependant je ne considère pas comme prouvé qu'il est le critère de dernière instance. Sans vouloir faire du paradoxe, je dirai: gardons-nous de rendre absolu même un édifice fondé sur la relativité.

On pourrait aborder le problème d'ordre géométrique du monde en posant la question brutale: Quelle est la géométrie particulière dans laquelle se déroulent les phénomènes physiques ? Toutefois, on ne pourrait pas y répondre parce que cette question présuppose la connaissance du type de multiplicité auquel on a affaire.

Pour tourner la difficulté, il est alors correct d'employer, en première approximation, une multiplicité euclidienne (ou pseudo-euclidienne), au même titre où l'on remplace, dans un domaine suffisamment petit, des relations fonctionnelles inconnues par des relations linéaires fournies par les premiers termes de la série de Taylor correspondante.

Par l'usage de ce procédé asymptotique, on évite la détermination immédiate de la géométrie particulière qui s'applique le mieux à l'univers. Nous nous en contenterons, et l'élimination de ce premier problème nous dispensera de rappeler ou d'analyser tous les débats qui se sont déroulés pendant trente ans à propos de la relativité généralisée en tant que cosmologie.

Ce qui reste alors, c'est bien un problème général, celui de connaître la sorte de multiplicité géométrique avec laquelle il convient d'opérer. D'une manière plus précise: connaître le nombre de ses dimensions et la nature physique de chacune d'elles. Nous qualifions donc de général le problème toujours posé dans la théorie de la relativité dite restreinte et de particulier celui qui se pose dans la théorie dite de la relativité généralisée.

Il reste certes des questions à débattre dans le cadre de la relativité généralisée. Le problème cher à Einstein d'une théorie unitaire du champ, qui n'est malgré une remarque précédente pas à mépriser, n'a encore trouvé aucune solution.

Bien rares sont d'ailleurs les essais de fournir des explications d'un type quantique, corpusculaire, ou même superquantique[7] de la gravitation, bien qu'ils existent.

Les tentatives de théorie unitaire sont prématurées, car on est loin de connaître tous les champs qui peuvent encore se présenter à notre esprit de découverte; à l'époque où l'on ne connaissait que le champ électromagnétique et celui de la gravitation (au sens einsteinien), on pouvait être tenté d'unifier, mais maintenant que l'on distingue autant de champs qu'il y a de types d'ondes-corpuscules qu'on est loin de bien connaître et surtout de connaître tous, l'unification n'est pas faisable. Peut-être est-ce même une erreur de chercher une théorie unitaire; la relation d'antimorphie dont il sera question en détail plus loin pourrait le faire croire.

C'est l'électromagnétisme qui a révélé l'ordre et la nature de la multiplicité, appelée depuis l'espace-temps: Les équations de Maxwell, qui décrivent les phénomènes électromagnétiques, ne conservent leur forme lors d'un changement d'observateur que si on leur applique les transformations de Lorentz. Poincaré ayant montré que ces transformations forment un groupe, aucun observateur ne peut se distinguer des autres pour servir de référentiel singulier. On doit en conclure qu'il n'y a d'absolu ni dans l'espace, ni dans le temps et les transformations en question montrent qu'espace et temps se muent l'un en l'autre. De là provient ce concept d'espace-temps qui bouleverse les représentations anciennes auxquelles on était habitué. Tel est le pas décisif fait par Ein-

---

[7] Soit dans le cadre de la deuxième quantification, soit au moyen d'une théorie dépassant le cadre de la quantification première ou deuxième.

stein, qui consista à rejeter non seulement l'absolu spatial mais aussi l'absolu temporel; ni Lorentz, ni Poincaré n'avaient su le franchir. Il y a eu des résistances à accepter cette manière de voir, il y en a même encore aujourd'hui. L'insistance que j'ai déjà mise et que je réitérerai à affirmer la primauté du concept de temps en rapport avec la canonicité pourrait donner l'impression que je fais partie de ces antirelativistes. Ce serait une méprise totale; je ne veux pas ressusciter un temps absolu, mais faire sentir le genre d'opposition qui se manifeste entre la relativité précisée dans les transformations de Lorentz et la canonicité qui fait règle dans tous les phénomènes dynamiques connus.

Comme le relève Edm. Bauer[8], il serait illogique d'admettre pour la mécanique un premier principe de relativité s'exprimant par le groupe des transformations de Galilée, et pour l'électromagnétisme un second avec le groupe de Lorentz. On n'aurait pas un seul principe, et comme le premier est une espèce d'approximation du second, il y aurait ainsi dans la description des phénomènes une hiérarchie que rien ne justifie. C'est avec de bonnes raisons qu'on a donc rejeté le groupe de Galilée au profit de celui de Lorentz et cette décision a transfiguré à tel point la représentation des choses qu'on en est venu généralement à considérer les exigences relativistes nouvelles comme l'instance supérieure pour décider de l'acceptation définitive des théories en élaboration. Et puisque les transformations de Lorentz sont celles qui laissent aux équations électromagnétiques de Maxwell leur variance, l'électromagnétisme sous cette forme est apparu comme la théorie correcte de l'électricité, opposée à la théorie mécanique incorrecte.

Cependant, le développement historique récent de l'électromagnétisme ne révèle pas uniquement la seule tendance relativiste mais une seconde aussi. Une théorie copiée sur la mécanique classique est non seulement incapable de décrire correctement les phénomènes électriques résultant des mouvements relatifs, elle ne peut davantage les décrire à l'échelle atomique. On n'insiste jamais assez sur le fait que l'atomisme, c'est aujourd'hui l'électromagnétisme tout entier. On comprend alors que non pas une seule, mais deux théories nouvelles se soient fait jour dès le début du XXe siècle. L'une, plus tardive en date d'ailleurs, la théorie de

---

[8] Edm. Bauer, L'électromagnétisme hier et aujourd'hui (Paris 1949, p. 154).

relativité dite restreinte, a pour but de décrire les phénomènes électriques où les vitesses relatives peuvent s'approcher indéfiniment d'une vitesse limite communément appelée vitesse de la lumière; cette première théorie fait nécessairement abstraction des effets de la gravitation. L'autre, la théorie des quanta, pourrait parfaitement s'appeler théorie atomique de l'électricité; elle se pose des conditions n'ayant, à première vue du moins, aucune connexion directe avec celles qui déterminent la première théorie; ce sont des conditions d'atomicité. Les effets de la gravitation lui sont également étrangers.

Or, la gravitation est le phénomène central autour duquel s'est développée toute la mécanique. On a l'impression que la découverte d'un phénomène totalement différent (l'électromagnétisme) a nécessité une théorie différente, elle-même incapable d'expliquer le phénomène précédent. Alors, n'est-il pas surprenant et même inquiétant qu'on ait trouvé deux théories et non pas une seule pour décrire ce phénomène nouveau ?

Si nous avons décidé de laisser de côté la discussion sur la réintégration de la gravitation grâce à la relativité généralisée d'Einstein, ce n'est pas que nous ne sachions qu'il y a là une démarche essentielle à tenter.

Parallèlement, on devrait aussi bien déplorer que la gravitation ait disparu par suite de l'analyse quantique et désirer qu'elle y soit intégrée par une généralisation appropriée.

Mais il n'y a pas de raison d'être surpris de sa disparition forcée des théories sur l'électricité. D'ailleurs il y a peut-être un moment historique et même un soupçon d'anthropomorphisme caché, inconscient, dans les tentatives de réintégration de la gravitation, parce que celle-ci est sensible à l'homme, tandis que le phénomène électromagnétique ne l'est pas, bien qu'il soit extraordinairement plus intense que le précédent[9].

4. L'antinomie de la relativité et de la canonicité

Il est très remarquable que deux théories se soient développées, l'une particulièrement bien adaptée à l'emploi de la notion d'onde grâce à l'équation aux dérivées partielles de type hyperbolique

[9] Pour autant que cela a un sens de «comparer» la masse et la charge d'une même particule élémentaire.

qu'elle établit, l'autre mieux faite au contraire pour la description des phénomènes corpusculaires, où la notion de système garde à peu près sa signification mécanique[10].

La première théorie reste dans un cadre strictement spatio-temporel, mais elle abandonne les transformations de Galilée au profit de celles de Lorentz. La seconde s'applique à conserver un tout autre caractère, celui de la canonicité, qui n'a de relation directe avec le caractère spatio-temporel que fortuitement et dans des cas particuliers[11]. Comme la première théorie remplace par une formule meilleure une ancienne formule de relativité devenue inadéquate, la seconde substitue à l'expression classique insuffisante de la canonicité une expression quantique adaptée aux exigences nouvelles.

On a souvent expliqué ce qu'il faut entendre par relativité du temps et de l'espace, si bien que la théorie qui traite de cette matière est devenue familière à un public scientifique et philosophe assez large. On estime même qu'un philosophe moderne se doit de comprendre l'idée maîtresse de la relativité, et on entend par là celle de Lorentz-Einstein. Mais cela ne saurait aller sans l'idée de relativité qui l'a précédée, celle de Galilée, qu'on a tenue si longtemps pour évidente et qu'on n'avait pour cette raison presque jamais critiquée ni même commentée, alors que ce sont en réalité l'enseignement répété et l'habitude qui nous l'ont fait apparaître avec son prestige.

---

[10] Il est vrai, inversement, que la description relativiste comporte (mais en germe seulement) la possibilité de création de ce qu'on a l'habitude d'appeler des paires de particules, ce qui lui confère jusqu'à un certain point le caractère d'une théorie corpusculaire, et que la description quantique traite des états stationnaires et des invariances adiabatiques qui rappellent particulièrement les propriétés ondulatoires. Mais on peut fort bien considérer les paires comme paires d'ondes et la notion de corpuscule suffit à l'interprétation des résultats quantiques aussi longtemps qu'on se borne à l'emploi des méthodes de mécanique quantique par opposition à celles de la mécanique ondulatoire qui lui est isomorphe.

[11] Il est connu que les transformations de Galilée comme celles de Lorentz sont aussi des transformations canoniques. Mais cela ne détruit en rien la distinction faite entre la spatio-temporalité et la canonicité. Nous reviendrons sur ce sujet (comparer en particulier avec la note 12 à la page 98 ainsi que la note 26 à la page 106).

Il serait désirable que les notions fondamentales autour desquelles se groupent les explications quantiques soient autant appréciées par ce large public. De fait, on voit les philosophes se mettre peu à peu à la conquête de la complémentarité et des concepts connexes dont ils sentent l'importance non seulement dans le cadre des raisonnements de physique, mais dans un domaine de la pensée beaucoup plus vaste. Est-ce déplacé de leur demander alors, comme en relativité, de s'assurer tout d'abord qu'ils savent où l'on a commencé, où se trouve le germe des considérations décisives, bref qu'ils ont compris le sens des relations classiques à partir desquelles le développement ultérieur, quantique et complémentaire, s'est fait ?

Ces relations se groupent autour de la canonicité. Les deux mots de relativité et de canonicité forment une paire admirable. Il est utile d'expliquer en quoi cette dernière consiste.

Succinctement, je dirai que la mécanique est toujours en mesure de choisir les grandeurs dont elle se sert, de façon que ces grandeurs se groupent par paires (exemples, voir la note [2] ci-dessus); l'un des partenaires d'une paire s'appelle coordonnée généralisée, l'autre en est le moment dit: canoniquement conjugué; cette conjugaison canonique se manifeste dans le fait que coordonnées et moments conjugués évoluent tous en vertu d'équations formellement semblables, avec cette différence cependant que soit les coordonnées ensemble, soit les moments ensemble peuvent réagir à un renversement du signe du temps, mais jamais et les uns et les autres à la fois. Les représentations spatiales ordinaires ne nous ont pas accoutumés à relier de cette manière la position ou lieu, avec ce que Newton a appelé la quantité de mouvement, qui est le moment canoniquement conjugué le plus ancien connu, propriété des corps ayant une valeur numérique d'autant plus grande que l'inertie en est plus importante et le mouvement plus rapide. Un penseur non avisé se dira que le lieu est une pure affaire de géométrie, tandis que la quantité de mouvement est celle de la dynamique. Cependant, assez longtemps après Newton, la mécanique a relié ces notions l'une à l'autre par l'intermédiaire d'une *grandeur* qui, responsable des actions qu'exercent les corps les uns sur les autres, *remplace* avantageusement *la notion de force.* Cette démarche, commencée par Lagrange et achevée par Hamilton, est la plus importante qui ait été faite dans ce domaine de la science depuis l'époque de

Newton. Dès lors, coordonnée et moment ayant été associés, conjugués, l'un d'eux ne peut s'isoler dans un monde de concepts étranger au domaine de l'autre; le lieu en particulier devient une notion aussi physique que la quantité de mouvement. En termes généraux, les coordonnées et leurs moments conjugués se classent au même titre dans l'ensemble des notions véritablement physiques. La seule distinction qui persiste encore entre le localisé et le dynamique, c'est la canonicité; celle-ci implique la réversibilité soit de l'un, soit de l'autre envers le signe du temps, mais non pas des deux à la fois. La connexion de canonicité par paires est réalisée par une grandeur spéciale, la même pour toutes les paires, caractéristique donc fondamentale du système mécanique; c'est soit le *lagrangien,* soit *l'hamiltonien,* qui se déduisent automatiquement l'un de l'autre. Il est extrêmement remarquable que presque dans tous les cas pratiques, l'hamiltonien coïncide avec l'énergie totale.

Nous voilà, après ces explications, conduit loin de la relativité du temps et de l'espace.

J'ai insisté sur la conséquence importante de la canonicité qui réside dans la réversibilité alternative des coordonnées ou des moments. Les physiciens se sont demandé si, du temps lui-même, on pourrait faire une coordonnée. Si oui, une espèce de relativité du temps et des coordonnées s'en suivrait et l'on pourrait éventuellement parvenir à unifier cette relativité et celle dont Lorentz, Poincaré et Einstein se sont occupés. On parvient formellement à égaler le temps à une coordonnée supplémentaire, mais l'unification de cette sorte de relativité avec celle d'Einstein n'est possible que s'il s'agit d'une particule unique et si l'on se borne à considérer des coordonnées que même Descartes aurait déjà tenues pour telles[12]. Or, dans la relation de canonicité, on peut choisir pour coordonnées les grandeurs les plus diverses, des composantes de champs ou de potentiels électromagnétiques, par exemple; on pourrait même échanger les coordonnées primitives contre leurs moments conjugués. Quel que soit le choix fait, le temps, lui, reste identique à lui-même; en en faisant une $(f+1)$me coordonnée, on

---

[12] Comparer avec la note 11 à la page 96. Il existe bien une théorie multitemporelle (Dirac, Fock, Podolsky), mais elle ne fournit que des résultats formels aussi.

élargit le formalisme, mais on ne change, comme les calculs détaillés le montrent[13], rien au fait que la canonicité réside dans la connexion par paires, dans l'assimilation de la position à une notion parfaitement dynamique.

En vertu de la canonicité, il n'y a plus de cinématique indépendante[14]. Alors, comment concilier relativité, d'une part, et canonicité de l'autre ?

5. *Le problème de l'espace, donnée première?*

L'analyse qui vient d'être faite a ravivé la conception d'un temps distinct du lieu, qui avait été effacée par l'analyse relativiste, sans pour cela rétablir un temps «absolu». Nous sommes ainsi placés devant un problème qui intéresse autant le philosophe que le physicien et même le géomètre: Est-il correct de considérer l'espace comme une donnée primordiale ? La physique doit-elle l'employer au titre d'une notion première s'imposant, éventuellement, en même temps que quelques autres notions premières, logiquement avant toutes les autres ? S'il faut répondre positivement à cette question, je proposerai de dire que l'espace bénéficie de la *primauté épistémologique*. La question se pose donc de savoir si l'espace jouit de cette primauté épistémologique.

Sur le plan axiomatique tout d'abord, on peut fort bien accorder à l'espace une place première, sans que cependant il soit nécessaire de le faire. On montre que ce n'est pas nécessaire en rappelant qu'en principe on peut remplacer un groupe de propositions premières non démontrées par un groupe équivalent, et qu'on peut imaginer que l'un de ces groupes utilise l'espace comme l'un des concepts non expliqués, tandis que l'autre n'en ferait pas usage. Dans une construction de la physique se basant sur le second groupe, l'espace apparaîtrait au terme de quelque définition explicite et n'aurait par conséquent pas la qualité primale. Pour entrevoir la possibilité axiomatique d'utiliser une notion

---

[13] Voir A. Mercier et E. Keberle (Archives des Sciences, *2*, 186, 1949) et A. Mercier (Archives des Sciences, *2*, 403, 1949).

[14] Dans une note parue dans l'Annuaire de la Société suisse de philosophie (II, p. 141, 1942), nous avons déjà expliqué que le temps ne joue pas le rôle isolé qu'on lui attribuait autrefois entre l'espace et la matière.

première d'espace, il suffit de s'en référer à un des groupes possibles des dimensions irréductibles de la mécanique, par exemple temps, longueur et masse, parmi lesquelles la longueur est la qualité algébrique dimensionnée de l'espace, à laquelle s'ajoute la qualité tensorielle avec toutes ses classes irréductibles de scalaire, vecteur, etc.[15]. L'espace ordinaire est la multiplicité obtenue en attribuant la dimension de longueur à une triple infinité de vecteurs ayant puissance du continu.

Cet espace-là est-il une notion première ?[16] A cette question, la réponse est affirmative pourvu qu'on la pose à propos d'une *primauté* que j'appellerai *axiomatique* pour la distinguer de la primauté épistémologique, alors que, posée à propos de cette dernière, la question n'est pas tranchée.

Nous ne voulons en effet pas rester sur le plan axiomatique, purement formel, dans l'étude entreprise ici, mais atteindre à une connaissance qui pèse les termes à toutes les mesures[17]. Déjà la mécanique classique analyse des mouvements que l'on reconstruit au moyen de fonctions $x(t), \ldots$ et de leurs dérivées $\dot{x}(t), \ldots \ddot{x}(t) \ldots$ Dans ces fonctions, il est question de longueur, de temps, de vitesse... avec leur caractère tensoriel si l'on veut être complet. Certains interprètes, tel Bergson, ont pensé que le temps se mesure par le mouvement, ce qui est faux, car le temps ne se «mesure» que par la répétition identique d'un phénomène reconnaissable. Ce qui est parfaitement correct, serait de dire simplement que le lieu est une fonction du temps[18]. Si les seules répétitions identiques étaient d'ordre spatial, on serait autorisé à dire que le temps se mesure en fin de compte à l'aide de l'espace, au besoin du mouve-

---

[15] Nous tenons pour faux les essais de réduire à moins de trois le nombre des dimensions irréductibles de la mécanique.

[16] Ailleurs, nous avons dit notion a priori (voir par exemple Logik und Erfahrung in der exakten Naturwissenschaft, Bern 1941).

[17] Dans plusieurs travaux précédents, par exemple celui cité à la note précédente, nous nous sommes placé consciemment sur le plan axiomatique. Il n'y a pas de contradiction entre ceux-ci et le présent travail.

[18] De ce fait, le lieu n'est pas le croisement pur et simple de trois surfaces au sens géométrique, mais une propriété physique d'un être physique qu'il n'est pas nécessaire de spécifier dans chaque cas. On parle *du lieu* comme on parle *de la température*. C'est principalement pour les besoins de l'intégration riemanienne qu'on fixe le point par des coordonnées.

ment. Cela peut sembler être le cas à un homme habitué à s'aider presque exclusivement de ses yeux comme instrument d'expérience pour parvenir à fixer mentalement les états possibles du monde extérieur, et cet homme sera tenté de croire alors que l'espace est premier et le temps second. Ce serait là une estimation légitime en tant que subjective. Alors la relativité einsteinienne devrait suffire à le faire réfléchir sur la certitude de cette estimation.

Mais l'aveugle que l'on frapperait dans le dos à un rythme calculé par exemple sur les battements de son cœur y sentira une horloge comme l'homme aux yeux normaux voit une horloge au clocher du village.

Et puis, la mécanique donne, tous calculs faits, $x(t)$ et non pas $t(x)$. Cela déjà suggère avec quelque insistance que t est premier et que x est second.

Dès qu'on élabore une théorie où la canonicité joue le rôle décisif, l'espace est relégué au rang de notion seconde. On le voit tout particulièrement dans la fusion des f coordonnées généralisées avec les f moments qui leur sont conjugués en une multiplicité à $2f$ dimensions qu'on appelle la multiplicité de phase. C'est cette multiplicité avec toutes les propriétés qu'on peut lui attribuer qui est passée au second rang épistémologique.

La théorie des quanta n'a pas supprimé cet état de choses. Elle l'a même renforcé. D'une part, sous la forme de la mécanique ondulatoire, la théorie quantique calcule des fonctions d'onde qui sont essentiellement fonctions du temps et qui sont ensuite, selon les besoins de la description, fonctions de paramètres pouvant être soit des coordonnées, soit des moments conjugués. D'autre part, sous la forme matricielle, elle opère avec des matrices Q_i et P_i dont on cherche en fin de compte les valeurs propres dans les états stables.

Si nous ne connaissions que la relativité comme principe constructeur d'une théorie physique, nous serions certes tentés d'attribuer à l'espace (et au temps simultanément) cette qualité épistémologique primale que nous sommes en train d'analyser. Mais la canonicité s'y oppose. De nouveau, l'antinomie relativité—canonicité se dresse, et je crois qu'elle suffit à justifier déjà ma réponse à la question posée. Je dirai que l'espace n'est pas indiscutablement un concept premier. La question posée pour l'espace se pose aussi pour d'autres notions. Relativité et canonicité, dans

leur antinomie, appellent la question concernant le temps lui-même. Nous la reprendrons un peu plus loin. Mais avant d'en arriver là, terminons l'analyse de la canonicité et résolvons l'antinomie.

6. *La canonicité, germe du statistique et du quantique*

La canonicité oblige pour ainsi dire à faire usage des représentations abstraites dans la multiplicité de phases. Il s'ensuit un théorème célèbre dit de Liouville en vertu duquel les cellules qu'on peut découper dans cette multiplicité se conservent en grandeur quelles que soient les transformations canoniques qu'on leur fasse subir, et cela comprend même l'évolution mécanique du système. On parle le plus souvent de conservation de l'énergie, de celle de la quantité de mouvement, de celle de la charge électrique, mais on n'a jamais insisté, hors des mémoires spéciaux sur ces matières, sur cette conservation de la mesure des cellules de phase. C'est cette conservation qui rend possible la statistique physique, c'est-à-dire toute la fondation mécanique de la thermodynamique. Cela ne veut pas dire que la canonicité entraîne la statistique. Il reste entre la mécanique et la statistique physique la différence entre le rationnel et l'irrationnel, entre le microscopique (fin) et le macroscopique (grossier); la nécessité de l'imprécis persiste pour effectuer le passage de la première à la seconde; bref, c'est le mystère de l'innombrable[19].

---

[19] Nous appelons dénombrable (on devrait peut-être dire physiquement dénombrable pour éviter une confusion avec les conventions mathématiques) un ensemble d'objets dont il est physiquement possible de désigner tous les éléments par un signe; c'est le cas en particulier d'objets en nombre fini soumis aux lois de la mécanique rationnelle. Nous réservons l'adjectif «nombrable» (sans préfixe) pour un ensemble dont les objets ne se confondent pas en un continu, mais sont momentanément distincts les uns des autres par paires, de façon telle qu'il y ait une différence physiquement mesurable en l'une au moins de leurs propriétés. Dans ce sens, tout ensemble physique dénombrable est nombrable, mais il n'est pas toujours vrai qu'un ensemble nombrable soit physiquement dénombrable; c'est justement ce qui arrive pour les ensembles statistiques physiques. Nous appelons innombrable un ensemble nombrable qui n'est pas dénombrable. Cela paraît paradoxal d'attribuer à la fois les propriétés de nombrable et d'innombrable à un même ensemble. Cependant c'est intentionnelle-

Il n'est pas possible de fonder une théorie statistique sans quelque chose du genre des cellules de phase. Admettre que les cellules de phase puissent être infinitésimales au sens limite du calcul différentiel conduit à de grosses difficultés d'interprétation physique, car cela correspond à un concept limite où le nombrable passe au continu. C'est pourquoi il est sage, au moins tout d'abord, de ne parler que de cellules finies[20]. En serrant de plus près cette proposition, on découvre que l'application d'une mécanique statistique aux systèmes microscopiques innombrables ne va pas sans qu'on procède à une quantification préalable. C'est de cette façon qu'il conviendrait de mettre en évidence aujourd'hui la nécessité d'une théorie quantique. Et on pourrait aller jusqu'à dire qu'une statistique non quantique est illogique (pour autant qu'on ne la considère pas seulement comme une approximation pour les cas où la constante de Planck apparaît comme négligeable). En d'autres termes, si l'on veut faire une bonne statistique physique, il faut se munir tout d'abord d'une mécanique quantifiée. C'est en somme ce que fit Planck inconsciemment lorsqu'en 1900 il publia sa formule célèbre sur l'équilibre statistique de l'énergie rayonnante dans une enceinte fermée, qui a été le point de départ de la théorie des quanta tout entière.

Mais on peut chercher à créer une théorie quantique sans y être obligé par des exigences de nature statistique. Cette indépendance fut acquise en 1913 lorsque Niels Bohr créa les éléments d'une véritable dynamique quantique. Celle-ci s'appuie entièrement sur le caractère canonique de la dynamique employée jusqu'alors, et la mécanique quantique qui a suivi, grâce aux travaux de Heisenberg et d'autres continuateurs, fait de même.

Dès lors, toutes ces considérations ayant leur origine dans la canonicité, on peut dire que celle-ci est le germe du statistique

---

ment que nous le faisons, car là gît précisément ce qu'il y a de mystérieux dans le traitement statistique avec les conséquences qu'il entraîne (température, entropie..., irréversibilité).

[20] Le cas des cellules infinitésimales ne diffère physiquement pas de celui des cellules finies: la raison en est que même en imaginant des cellules infinitésimales, on ne peut transformer un domaine 2f-dimensionnel de l'espace de phase (l'espace gamma) en un domaine rigoureusement (2f—1)-dimensionnel (l'hypersurface d'énergie). Une explication détaillée de cet état de choses entraînerait à une dissertation d'ordre technique qui n'a pas sa place ici.

et du quantique. Le quantique a pris dans la seconde phase de développement de la théorie une ampleur extraordinaire; toutes les relations fondamentales qu'on y rencontre, soit dans la méthode de Schrödinger, soit dans celle de Heisenberg, se rattachent à la canonicité[21], et la synthèse de ces méthodes de mécanique quantique et de mécanique ondulatoire réalisée dans la théorie des observables de Dirac ou dans celle qu'on appelle la théorie statistique des transformations de Dirac, Jordan et v. Neumann a situé la canonicité à l'origine des explications de tout le microcosme[22].

Les théories à venir devront certainement accorder dans une très large mesure une place à ce formalisme de canonicité qui est comme fait à point pour préciser les découvertes sensationnelles de l'incertitude et du quantifié. Il est grand temps qu'on y insiste et c'est pourquoi j'ai mis particulièrement en relief l'ordre de canonicité au grand détriment de celui de relativité tant célébré depuis quelques décennies. On aura l'impression que je donne la préférence au concept de temps, et je ne puis cacher que ce concept me paraisse dominer par sa primauté épistémologique toute la série des préoccupations intellectuelles accédant à la connaissance du monde. D'aucuns plaçaient la matière seule au centre de ces préoccupations; la matière, pour eux, était l'origine de tout; ceux qui ont voulu en tirer une doctrine ont été classés dans ce qu'on appelle le matérialisme.

Si l'on pouvait établir une doctrine où le temps serait rendu plus ou moins responsable de tout, ce serait un «temporalisme».

C'est cependant à la synthèse de ces deux notions que la physique moderne donnerait la préférence. Le temps «explique» (au sens de «déplie»[23]) la matière; sans le temps, nous n'aurions pas (le concept de) la matière. Mais inversement, c'est le propre de la matière de «susciter» le temps, — susciter dans une acception

---

[21] Cela, bien que le caractère ondulatoire des ondes-corpuscules et par conséquent l'idée d'une mécanique ondulatoire soient d'origine relativiste. (Comparer notre communication au Congrès de philosophie des sciences, Paris, octobre 1949 et la publication correspondante dans les Proc. Amsterdam Academy, LIII, 50, 1950.)

[22] La théorie des transformations est l'élaboration la plus poussée qu'on ait de l'expression de la canonicité des phénomènes naturels.

[23] Pour le sens du mot *expliquer*, voir E. Meyerson: De l'explication dans les sciences (Paris 1927, dès le début du chapitre premier).

totalement réaliste de ce verbe (comme on le trouve dans ressusciter)[24].

Faire de cette double constatation le point de départ d'un système philosophique serait créer un matério-temporalisme. C'est exactement ce qu'en 1946, dans la discussion d'un rapport[25], Karl Popper me reprochait amicalement de faire; il disait néanmoins à cette époque «matérialisme» tout court, mais concédait qu'il s'agissait là d'un matérialisme nouveau. D'ailleurs il ne s'agit pas de prendre une position philosophique avec tout le système qu'elle entraîne, il n'est question que d'une constatation épistémologique résultant d'une analyse des énoncés de la science contemporaine; position par conséquent toujours provisoire et servant de point de vue pour scruter le monde.

7. *La complémentarité de Bohr et l'antimorphisme qui s'en distingue*

Que cela soit entendu, je ne rejette aucunement la relativité de l'espace-temps lorsque je recommande une position matério-temporaliste; la relativité est chose acquise. Les physiciens lui accordent en général un crédit plus grand encore qu'ils ne le font pour la canonicité; ils admettent le plus souvent comme dernière

---

[24] Le sens que prenait autrefois le mot de matière était incomparablement plus pauvre que l'actuel. Aujourd'hui, matière sous-entend l'équivalence einsteinienne de la masse et de l'énergie. Un système physique est défini, d'une manière moderne, lorsqu'on connaît la fonction hamiltonienne qui en détermine l'énergie, masse comprise. (Il est vrai que dans la plus récente théorie quantique des champs d'onde, la définition des systèmes n'est plus simplement donnée par un tel hamiltonien, mais une certaine correspondance avec l'hamiltonien persiste.)

Avec l'hamiltonien, on forme par exemple l'équation dynamique de Schrödinger qui couple directement les deux notions de matière et de temps et le formule d'une façon mathématique parfaitement claire.

Il est un fait qui peut inciter à mettre en doute la connexion qui lie matière et temps, c'est celui que l'énergie dite potentielle est caractérisée par une certaine atemporalité. Toutefois, n'est-ce pas précisément dans sa potentialité qu'elle possède la temporalité? elle la possède «à l'état potentiel». D'ailleurs l'irréversibilité des phénomènes naturels entraîne une dissipation de toutes les formes rationnelles de l'énergie, en particulier la forme potentielle, de sorte que cette dernière ne fournit en fin de compte pas une réfutation de la connexion relevée ci-dessus.

[25] Réunion de *Synthèse* à Huizen s. Amsterdam.

instance, comme critère ultime l'accord des théories avec les exigences d'une variance relativiste.

Je ne crois pas que les positions relativiste et matério-temporaliste constituent une contradiction inextricable. Elles m'apparaissent bien plus comme les termes d'une alternative en un sens comparable, mais non identique, à celle de complémentarité de Bohr. Ne pourrait-on pas, sur cette question, s'exprimer comme suit?

Lorsqu'on considère les phénomènes à la lumière d'une explication purement canonique, poussée, si l'on veut, jusque dans ses ramifications quantiques, on se réfère à un temps (mesurable) unique. Mais les seules transformations auxquelles on attribue un sens, celles qu'on appelle canoniques, ne toucheront pas à l'unicité de ce temps[26]. Cela n'implique en rien qu'il y ait un temps absolu; la question de savoir si le temps employé est absolu ne se pose pas.

Lorsqu'en revanche on considère les phénomènes à la lumière d'une explication purement relativiste au sens de Lorentz-Einstein, on pose l'existence d'un ensemble d'observateurs ayant chacun son temps propre.

Dans ces deux manières de faire, les prémisses ne sont pas contrôlables en soi. Ni le procédé canonique qui emploie un temps unique dans la première manière, ni la relativité avec les temps multiples dans l'autre, ne doivent être envisagés comme données accessibles à une expérience directe et cruciale. Chacune est un «nomos», dont l'application individuelle est susceptible d'être couronnée de succès. Toutefois, ne sachant d'emblée ce qu'elles peuvent avoir de commun ou de distinct, on ne s'étonnera pas si leur emploi simultané crée une situation antinomique.

Rappelons maintenant qu'une exigence spatio-temporelle purement relativiste a suffi à L. de Broglie pour construire une onde de matière, et, à Niels Bohr, une exigence du type canonique pour fonder l'ancienne théorie des quanta[27].

---

[26] Voir la note 11 à la page 96. L'énoncé ci-dessus ne concerne pas le fait que les transformations de Lorentz sont un exemple de transformations canoniques, car dans celles-là, le temps n'est pas unique. En revanche, il vaut la peine d'insister sur le fait que les transformations de Lorentz sont dans ce sens toujours canoniques, alors qu'on ne peut pas prétendre que toute transformation canonique soit un exemple de transformation de Lorentz.

[27] et par extension, grâce à la correspondance, la nouvelle.

Superposer ou imposer la description relativiste à la description canonique, ou l'inverse, c'est provoquer la situation antinomique. On ne l'a pas vue dans le cadre d'une mécanique non quantique, en tout premier lieu parce qu'on ne l'a pas cherchée, et ensuite parce qu'on ne l'y reconnaît pas dans toute sa profondeur, mais seulement voilée par la difficulté particulière à ne pouvoir traiter le temps canoniquement et relativistement à la fois autrement que par un artifice sans signification réelle[28].

Dans sa plénitude quantique, cette situation va de pair avec la complémentarité de Bohr; mais il ne faut pas les confondre. La complémentarité oppose tant l'onde au corpuscule que les grandeurs conjuguées les unes aux autres par paires jusque dans la relation d'Heisenberg. Elle classe et le cas de la dualité et celui de l'incertitude dans deux ordres incohérents du raisonnement physique. Il est par exemple bien connu qu'une incertitude persiste entre coordonnées x, y, z et quantités de mouvement p_x, p_y, p_z sous la forme

$$\Delta x \, \Delta p_x \approx h, \; \Delta y \Delta p_y \approx h, \; \Delta z \Delta p_z \approx h.$$

Un raisonnement relativiste a fait prétendre qu'il devait exister aussi une relation

$$\Delta t \Delta E \approx h$$

entre le temps et l'énergie; et néanmoins cette dernière relation, si elle existe bien, ne saurait être interprétée comme incertitude; ce serait faire une faute de raisonnement quantique[29].

Or, en vertu de la complémentarité de Bohr, la dualité et l'incertitude sont en dernière analyse ramenées à une seule et même chose, aussi paraît-il au moins très dangereux de vouloir les composer en faisant agir le formalisme réglant l'une, sur le résultat de l'opération déjà obtenue par l'application du formalisme réglant l'autre. L'antinomie de la relativité et de la canonicité se projette sur une opposition de forme, parce que leurs formalismes respectifs règlent ces deux manifestations de la complémentarité. Elle se résout sans contradiction aussitôt qu'on la considère comme une simple antimorphie. C'est aussi le mot que nous emploierons.

---

[28] Ce problème fait l'objet d'études en cours.

[29] Pour des explications plus complètes, voir Ed. Keberle, Thèse de doctorat (Berne 1948).

Antimorphisme et complémentarité dessinent ainsi un chassé-croisé.

Il est important de redire ici que la théorie de la relativité restreinte et la théorie des quanta sont surtout et à l'origine deux théories des phénomènes électriques. Leur but a donc quelque chose de commun, et pourtant elles diffèrent considérablement dans leur base comme dans leur méthode, et tout particulièrement dans le genre d'assertions qu'elles permettent de faire.

L'un des problèmes les plus étudiés de la physique actuelle est de formuler une théorie qui soit à la fois relativiste et quantique. Il paraîtra, après ce qui a été dit, douteux qu'on y parvienne par les méthodes essayées où les deux formalismes restent accouplés. On a bien l'équation de Dirac, mais elle entraîne justement des conséquences si peu croyables qu'on peut bien taxer celles-ci d'antinomies. Cela n'empêche pas, il est vrai, qu'étant le premier essai de théorie prétendant relever des deux formalismes aux pôles de notre antimorphie, l'équation de Dirac constitue une des acquisitions les plus remarquables de la physique actuelle, et qu'elle représente une grande promesse pour l'avenir. Toutefois, à la lumière du nouvel antimorphisme, il n'est pas étonnant qu'elle conduise à des difficultés jusqu'ici insurmontées. L'imposition du relativisme au canonique telle qu'on l'a pratiquée jusqu'ici est une opération probablement contradictoire. Dans une théorie bien faite, les formalismes correspondants devraient vraisemblablement ressortir d'approximations alternatives et par conséquent se fondre en une règle d'ordre supérieur.

8. Divers aspects de la notion de temps en physique

On est trop souvent porté à croire que la mécanique newtonienne et la mécanique analytique de Lagrange et d'Hamilton (que j'appellerai canonique) sont équivalentes. En réalité on peut bien toujours donner la forme newtonienne correspondant à des relations exprimées tout d'abord sous leur forme canonique; en revanche on ne peut pas toujours exprimer canoniquement ce qu'on a formulé selon les principes de la mécanique newtonienne. On peut rendre cette différence plus évidente en disant qu'on parvient à donner l'expression des forces lorsqu'on connaît celle de l'hamil-

tonien ou du lagrangien, tandis qu'on ne peut pas toujours construire l'hamiltonien dans les cas où les forces sont données, en particulier dès qu'il existe des forces de frottement.

Or le frottement est un phénomène qui rentre dans la classe d'irréversibilité, où la direction d'évolution du temps est certainement unique. D'ailleurs, en mécanique newtonienne, le temps est employé d'une manière géométrique telle que les causes se traduisent en effets par une transmission immédiate dans l'espace entier, où le présent est partout identique à lui-même sans qu'il apparaisse nécessaire de définir la simultanéité. Le temps newtonien se présente, pour cela, sous l'aspect d'un temps absolu dans une mécanique dont on ne peut pas dire sans hésiter qu'elle soit strictement réversible. Cette attache de la mécanique newtonienne avec l'irréversible me paraît contribuer, à côté de la transmission immédiate dans l'espace, au caractère d'absolu conféré au temps qu'elle emploie.

La mécanique canonique, qui se détache d'une représentation strictement spatiale, se débarrasse de plus de toute implication irréversible. De la sorte, ce qu'il y avait d'absolu dans le temps newtonien n'apparaît plus dans le temps canonique. Mais le temps canonique ne se trouve pas pour cela incorporé à une multiplicité quelconque, il garde entièrement le caractère de notion première, il le possède même à un degré plus évident encore que ne le faisait le temps absolu newtonien[30] de la mécanique primitive. Le temps canonique n'est associé à aucune autre grandeur.

Par l'intermédiaire du principe de correspondance de Bohr, on passe de la mécanique canonique classique à la mécanique (canonique) quantique. L'emploi des interprétations classiques dans le quantique conduit à l'incertitude; mais le temps lui-même y joue un rôle «transversal» par rapport à l'axe des pôles de l'incertitude, car on parle d'incertitude en faisant une mesure «simultanée» de deux grandeurs conjuguées. Comment concevoir alors qu'on fasse une mesure «simultanée» du temps et d'une autre grandeur! Cela n'a pas de sens du point de vue quantique[31].

C'est le concept absolu du temps newtonien (et non pas celui du temps unique de la canonicité) qu'Einstein a délaissé pour le

---

[30] Comparer à la note 32 ci-dessous.

[31] Ce qui ne veut pas dire que cela n'ait pas de sens du point de vue relativiste.

remplacer par celui du relatif. Il se peut que ce passage ait conservé jusqu'à un certain point ce qu'il y avait de canonique dans le temps newtonien, mais cela n'est aucunement évident. Au contraire, la primauté, respectée dans l'unicité du temps canonique, fait place à la relativité d'un temps devenu quatrième composante d'un vecteur.

L'intervention relativiste me paraît être d'une portée plus grande que la démarche canonique qui substitue au caractère manifeste d'absolu celui beaucoup moins restrictif d'unique. Etant absolu, le temps classique[32] ressortissait déjà au relatif par le fait même qu'on le déclarait absolu: L'absolu est le cas limite du relatif[33].

Je serais en revanche tenté de voir dans la substitution d'un temps irréversible au temps réversible de la mécanique canonique une intervention comparable à celle de la relativité. Réversible est de nouveau un cas limite, alors qu'on l'oppose souvent à la gamme d'irréversibilité. Cette gamme est réalisée par tous les degrés d'innombrable qu'on peut imaginer entre le fini (quelconque) et l'infini. Elle dénonce un ensemble infini mais discret et se distingue par là notoirement des degrés de relativité possibles qui, mesurés aux diverses vitesses que la lumière pourrait théoriquement prendre, engendrent un continu. La tendance relativiste correspond donc au désir de faire une physique continue, la tendance statistique à celui de faire une physique discrète. Les systèmes de référence relativistes forment une triple infinité non dénombrable, les cellules nécessairement finies (= non infinitésimales) d'espace de phase une infinité dénombrable.

Mais de plus, lorsqu'on cherche à construire une évolution irréversible sur la base de la mécanique typiquement réversible en

---

[32] Si nous ne répétons pas ici l'adjectif newtonien et parlons subitement de temps classique, c'est parce que Newton lui-même avait l'idée d'un temps idéalement absolu, non pas celui d'un cas extrême du temps relatif. Cependant, la forme des postulats de la cinématique galiléenne fait du temps employé en mécanique newtonienne un tel cas extrême; on le voit dès qu'on sait que les transformations de Galilée sont une approximation de celles de Lorentz pour le cas extrême où la vitesse de la lumière apparaît comme infinie.

[33] Cette relation rappelle formellement celle qui confère le caractère dynamique au cas statique pour lequel forces et couples résultants s'évanouissent.

soi, on est, comme l'a fait remarquer Dessauer, obligé de segmenter l'évolution irréversible jusqu'à en isoler tous les événements dont chacun est régi par un mécanisme en soi réversible, mais dont chacun se déroule à la suite des conditions initiales qui lui sont propres et qui fixent le sens dans lequel il se déroule. Selon Dessauer, il faudrait concevoir l'irréversible comme l'enchaînement d'innombrables réalisations d'événements renouvelés au sein d'un mécanisme donné. Ce serait donc à l'endroit des événements et à cause de leur innombrabilité que la théorie réversible faillirait à suivre toutes les phases de déroulement du mécanisme.

Il est impossible de justifier par des arguments de pure mécanique classique la manifestation d'innombrabilité de cet enchaînement, et lorsqu'on la postule, elle crée avec les principes de cette mécanique un paradoxe. Par contre, lorsqu'on remplace la mécanique classique par une théorie quantique (en soi réversible), on ne fait pas surgir de paradoxe pareil en la postulant, bien qu'on ne puisse pas non plus la justifier[34].

Il y a alors apparemment deux cas de réversibilité. L'un d'eux se manifeste lorsqu'un état statistique stationnaire se transforme infiniment lentement pour décrire une suite d'états stationnaires; c'est certainement un cas limite d'irréversibilité. L'autre est le cas dénombrable; le postulat d'innombrabilité s'évanouit et la mécanique réversible (quantique ou non) joue. Mais on peut dire que c'est là le cas idéal du premier, l'infiniment lent n'étant plus une condition nécessaire; ou, si l'on veut, c'est le cas extrême où l'innombrable dégénère en dénombrable.

Ensuite, le temps newtonien me semble, autant par son caractère relatif limite que par l'empreinte que lui laissent les phénomènes de frottement qu'il permet de décrire, trop restrictif pour autoriser une théorie suffisante des phénomènes irréversibles. Il a fallu non seulement éliminer cette empreinte d'irréversibilité mal marquée, mais surtout renoncer au cadre de relativité impliqué dans la notion d'un temps absolu pour pouvoir construire une statistique satisfaisante où les phénomènes se déroulent dans le temps d'une manière véritablement irréversible[35].

---

[34] W. Pauli, dans le volume jubilaire de A. Sommerfeld (Leipzig 1928).

[35] La mécanique newtonienne ne mène qu'à la théorie cinétique, qui suscite bien l'introduction de la notion de température, sans l'impliquer cependant,

Inversement, n'est-il pas vrai qu'il faut renoncer au caractère d'unicité (caractère du temps canonique aussi bien que du temps d'irréversibilité obtenu par extension du premier) pour élaborer une théorie complètement relativiste ?

Enfin, demandons-nous si le temps de la relativité restreinte peut être considéré comme un temps réversible. On le dit en général, mais cela paraît reposer sur une méprise; car de deux choses l'une: ou bien on pense à la réversibilité mécanique qui existe en l'absence de frottement ou d'autre dissipation, et ce n'est alors pas la relativité en soi, mais la dynamique postulée qui fait du temps employé un temps de réversibilité; ou bien encore on veut dire que le passé et l'avenir sont comme les demi-axes négatif et positif d'une coordonnée, ce qui n'est pas la réversibilité dynamique dont je parle.

9. Conséquences pour les sciences s'ordonnant à la suite de la physique et pour la classification des sciences en général

De l'analyse faite ressort qu'on est loin d'opérer avec un seul concept de temps dans la physique à elle seule[36]. Les sauts qui font passer soit du temps absolu au temps relatif, soit du temps canonique au temps d'irréversibilité de la statistique sont très grands. Aux deux niveaux du premier saut, la matière prend la place de perturbateur dans une représentation géométrique des phénomènes. A ceux du second saut, matière et temps s'impliquent l'un l'autre autant dans la description d'ordre réversible que dans celle d'ordre irréversible, et l'espace y joue le rôle de paramètre.

Il n'est par suite pas possible de considérer comme juxtaposés bien que séparables les concepts d'espace, de temps, de matière. En physique, temps et espace, ou temps et matière sont liés; ces deux liaisons distinctes sont les pôles de notre antimorphie, et il faut dans chacune bien comprendre ce que le mot temps veut dire.

---

tandis que la mécanique statistique, fondée sur la canonicité, implique nécessairement température et entropie.

[36] Dans une étude sur le temps (pour paraître dans les Mitt. der Bern. Naturf. Gesellsch.), nous avons relevé encore un aspect du temps que l'on découvre dans la rotation uniforme des astres isolés, l'aspect mathématique.

Il devient dès lors douteux qu'aux niveaux suivants des sciences positives, on puisse garder la juxtaposition simpliste de la classification positiviste. C'est en fin de compte aux biologistes, psychologues, sociologues, historiens, de dire si le concept temps y prend des significations diverses. Mais on est tenté de le croire. Ainsi, on connaît l'histoire du voyageur relativiste qui, lancé à grande vitesse, vivrait plus lentement que ses congénères restés en arrière; à son retour, ayant vécu disons dix années de son temps propre, il se trouverait par exemple en présence de ses arrière-petits enfants[37]. Or, rien ne nous dit que la vie suive effectivement ce schéma relativiste. Le schéma est correct en soi, et il est bien vérifié par l'expérience physique, où les voyageurs sont des particules dépourvues de vie; mais on ne sait pas si un être vivant vit à un rythme indépendant de la vitesse qu'il a par exemple par rapport à l'objet (plante qui a fourni la graine, mère...) qui lui a donné naissance. C'est l'expérience, faite avec des fusées se déplaçant à des vitesses comparables à celle de la lumière, qui seule pourra répondre à cette question. Or rappelons-nous que la vie apparaît actuellement, grosso modo, comme une faculté de la matière de se développer, temporairement tout au moins, en dépit de l'irréversibilité, à l'encontre de la croissance de l'entropie. Cela pourrait suggérer que la construction d'un temps vital se fera sur la ligne canonique menant à l'irréversibilité (pour la surmonter), plutôt que sur la ligne relativiste. Toutefois, on ne sait rien de défini.

En tous cas, à l'encontre de la classification positiviste, il serait plus satisfaisant de classer toutes les relations qui ne sont pas temporelles (et qui *pour cette raison* ne paraissent aucunement «positives») dans le domaine qui définit la mathématique dans son entière généralité. Les relations qui impliquent le temps sous l'une ou l'autre de ses acceptions, sont toutes spécifiques de la nature des choses, elles sont du domaine du positif et se classent dans l'ordre des sciences[38]. Les autres, étrangères au temps, ne sont pas naturelles.

---

[37] Voir par exemple G. Gamov, Mr. Tompkins in Wonderland (Cambridge Univ. Press 1939).

[38] Comparer à notre étude «Position philosophique de la physique parmi les sciences» dans Gymnasium Helveticum, *3*, 187, 1949.

Nous ne considérons pas la mathématique comme une science, mais comme la sous-structure des sciences.

Si l'on veut faire usage d'un adjectif commode, on dira — et ce sera là le résumé et la conclusion de ce travail — que le temps est la condition du concret, et que, vice versa, le concret se manifeste en fin d'analyse sous les diverses acceptions qu'il faut donner au concept si fondamental et premier de temps.

Je tiens à remercier mes collègues Arnold Reymond (Lausanne), Fr. Dessauer (Fribourg) et H. Greinacher (Berne), qui ont bien voulu lire ce mémoire et me faire des suggestions précieuses avant sa parution.