

La physique et le temps

Autor(en): **Rivier, Dominique**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **145 (1965)**

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90654>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La Physique et le Temps

Prof. DOMINIQUE RIVIER, Lausanne

1. INTRODUCTION

«*Qu'est-ce donc que le temps? Si personne ne me pose la question, je le sais. Mais si quelqu'un me demande de le lui expliquer, alors je ne sais plus!*»

C'est dans ces termes que, plein d'inquiétude et sollicitant de son Dieu la lumière, saint Augustin s'engage dans une des plus belles et des plus pénétrantes méditations qu'un philosophe ait jamais conduite sur le problème du temps.

Certes, ce sentiment d'embarras devant l'explication d'une notion première s'il en est, solidement enracinée dans le fonds du sens commun, n'a rien de particulièrement surprenant, même chez un maître de la pensée comme Augustin! N'écrivait-il pas à une époque où la science du temps n'était pas née, pas plus que la physique et la psychologie d'ailleurs, du moins au sens où de nos jours nous entendons ces sciences. Quoi donc de plus normal que ces incertitudes et ces doutes chez l'évêque d'Hippone au moment d'entreprendre une tâche pour laquelle, semble-t-il, lui faisaient défaut la plupart des instruments jugés aujourd'hui indispensables.

Or, plutôt qu'une sollicitude pleine de compréhension, c'est tout au contraire une sorte de ravissement de l'intelligence que ressent de nos jours le lecteur du onzième livre des *Confessions*. Comment imaginer qu'un sujet de l'Empire romain, d'avant la révolution copernicienne, d'avant la Renaissance, ayant vécu plus de mille ans avant Galilée et Newton, ait pénétré si profondément, découvert tant de mystères, ouvert à la pensée tant de chemins dans ce monde encore indéfini qu'évoque pour l'homme du XX^e siècle le seul mot de *temps!*

Je ne sais si de nos jours, questionné à brûle-pourpoint sur le temps, le philosophe serait plus au moins embarrassé que ne l'était saint Augustin... ce que je sais, par contre, c'est que la Physique contemporaine, malgré les retentissantes réussites que l'on sait, reste bien silencieuse sur le problème même du temps. Et pourtant, il y a une cinquantaine d'années de cela, les physiciens avaient enfin cru tenir une des clefs de l'explication de ce concept fondamental: la théorie de la relativité n'était-elle pas parvenue, pensait-on généralement, à réduire le temps à l'espace, ayant ainsi vaincu la difficulté majeure, inhérente semble-t-il à la notion même du temps: l'impossibilité de l'observer dans son extension. Or, des années ont passé et l'enthousiasme des physiciens s'est bien refroidi: non seulement l'obstacle que l'on croyait forcé tient toujours, mais d'autres sont survenus, plus épineux encore.

Il en va du temps comme d'autres notions fondamentales: au fur et à mesure que s'étend et s'approfondit la connaissance, scientifique ou philosophique, ces notions voient leur complexité – leur épaisseur, pourrait-on dire –, croître comme si la pensée les chargeait des fruits de son labeur.

C'est faire entendre qu'il ne saurait être question ici d'expliquer le temps... même de l'étroit point de vue du physicien. Pour la Physique comme pour l'homme, le temps se vit plutôt qu'il ne s'explique, et c'est de préférence à cet aspect mouvant d'une notion étroitement liée à l'histoire de la physique que j'aimerais m'attacher maintenant.

2. LA NAISSANCE DU TEMPS DURÉE, GRANDEUR CARACTÉRISTIQUE DE LA PHYSIQUE

Au sens où nous l'entendons aujourd'hui, la Physique est née avec les recherches de Galilée sur la chute des corps. Quelqu'importantes qu'aient été les découvertes astronomiques des Chaldéens, les théories cosmogoniques et les réussites mécaniques des anciens Grecs, il ne s'agissait là que d'éléments épars et fragiles, qui ne sauraient constituer une *science* au sens moderne du terme, par quoi j'entends un ensemble de connaissances rationnelles, ordonné suivant une méthode spécifique, et jouissant d'un degré suffisant d'unité, d'objectivité et de généralité.

Pourquoi les sciences physiques ont-elles attendu si tard avant de voir le jour, peut-on se demander, alors que, de leur côté, les mathématiques avaient déjà dans l'Antiquité construit l'essentiel de leur méthode et mis en évidence d'importants champs de recherches?

Entreprendre de répondre à la question peut certes paraître audacieux, et céder par trop facilement à l'attrait de la spéculation... Et pourtant, il va s'avérer que cette tentative conduit droit au cœur du sujet proposé.

On l'a bien justement et souvent souligné: face à la Nature, Galilée eût le grand mérite de substituer d'une façon claire et délibérée au «pourquoi» des penseurs grecs et médiévaux le «comment» apparemment moins ambitieux – mais peut-être plus exigeant – des hommes de science modernes. Toutefois, encore qu'il ne soit pas certain que Galilée ait été le premier à déclencher cette mutation radicale de la réflexion philosophique, il m'apparaît que l'action déterminante, le pas décisif et génial accompli par Galilée, celui qui a permis à la Physique moderne d'émerger des brumes – souvent admirables – de la pensée du Moyen Age, c'est l'introduction explicite du temps comme paramètre à la fois *expérimental* et *mathématique* dans la description des phénomènes naturels.

Alors que, dans la recherche d'une loi régissant la chute des corps, ses prédécesseurs tentaient de combiner les *espaces parcourus aux vitesses* (ce qui conduisait inévitablement à des relations dont la complexité relative cachait la simplicité de la loi à découvrir), Galilée – non sans peine et comme mû par une force irraisonnée – abandonne la vitesse au profit des *intervalles de temps ou durées* mises par le corps pour parcourir les espaces de chute. Cette émergence tardive et difficile du «*temps durée*»

comme paramètre de description des phénomènes naturels peut sembler surprenante à l'homme moderne, notamment au familier de la physique, pour qui la vitesse paraît se présenter naturellement comme grandeur *dérivée* de l'espace et du temps, supposés préexistants. Mais il ne s'agit pas d'un accident: l'histoire de la physique ne fait ici que corroborer de façon éclatante les découvertes de l'épistémologie génétique, selon lesquelles «il existe une intuition primitive de la vitesse indépendante de toute *durée* et ne supposant que l'ordre temporel et spatial».

C'est seulement après avoir introduit explicitement le *temps durée* comme paramètre que la Physique va pouvoir se développer. En effet, lorsque, quelques cinquante ans après la découverte de Galilée, Newton entreprend dans ses *Principia mathematica* de donner à la Physique une axiomatique fondée sur l'expérience, son premier soin est, comme il le déclare lui-même, de définir à nouveau certains termes «connus de tout le monde» qui «pour n'avoir été considérés que par leurs relations à des choses sensibles» ont fait «tomber dans plusieurs erreurs». C'est ainsi qu'il fixe la définition de l'espace absolu. Puis, comme si le génie de Newton avait immédiatement saisi le caractère primordial du nouveau paramètre utilisé par Galilée, c'est par le *temps* que l'auteur des *Principia* poursuit immédiatement, opposant le concept mathématique à la notion d'usage commun. «*Il faut distinguer*», écrit Newton, «entre le *temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur*», qui «coule uniformément et s'appelle *durée*», et «le *temps relatif, apparent et vulgaire*», qui «est cette mesure sensible et externe d'une partie de *durée* quelconque (égale ou inégale) prise du mouvement: telles sont les mesures d'heures, de jour, de mois, etc..., dont on sert ordinairement à la place du *temps vrai*.»

Alors enfin se trouve achevée pour le temps cette opération exemplaire, depuis systématiquement pratiquée par la Physique sur le réel: une *abstraction* tirant de l'analyse d'une notion encore complexe, élaborée à partir du sensible, un concept *mathématique* qui en devient la représentation adéquate: enfantement parfois pénible de la *grandeur physique* observable, mesurable et partant quantifiable. Et comme cela s'est produit bien souvent depuis pour d'autres grandeurs, la construction du temps physique s'est faite en deux étapes. D'abord une première élaboration intuitive, un usage encore mal fondé mais efficace – c'est le saut décisif, celui de Galilée; puis – et ce fut la tâche de Newton – une formulation explicite et rigoureuse, séparant en quelque sorte la grandeur physique nouveau-née de cette matrice que constituent pour elle les éléments fournis par l'analyse encore incomplète du donné sensible.

Sitôt apparu le temps mathématique, la Physique connaît un départ extraordinairement rapide. Ce sont en effet *les axiomes ou lois du mouvement* qui, déjà dans les Principes, succèdent immédiatement aux définitions *du temps, de l'espace, du lieu et du mouvement*. Newton fixe ainsi d'emblée non seulement à la Mécanique, mais à toute la Physique un cadre qui, retouché ici et là, tient encore aujourd'hui, à défaut d'un meilleur encore à trouver. Quant à ces lois du mouvement – dont la première n'est autre que le principe d'inertie de Galilée –, il s'agit de relations entre

les grandeurs dynamiques décrivant le système et celles qui précisent l'action de l'*extérieur* sur ce dernier. Le point important est que ces lois sont vraies à chaque instant, ce qui revient à dire qu'elles sont indépendantes précisément de la variable nouvellement introduite. C'est dans ce sens-là notamment que toute l'axiomatique de la Physique classique repose sur l'existence de la grandeur physique temps telle que l'ont dégagée Galilée et Newton.

Il vaut la peine de s'arrêter un instant à ce temps absolu de Newton: certaines de ses propriétés ne pourraient-elles pas en effet expliquer pourquoi, dans l'histoire de la pensée occidentale, l'apparition de ce concept fondamental s'est fait tant attendre? Le temps défini dans les *Principes* est un paramètre universel, uniforme, sans bornes dans le passé comme dans l'avenir et sans retour sur lui-même. Écoutons avec quel soin Newton insiste sur ces propriétés à la fois nouvelles et essentielles: «*On distingue en astronomie le temps absolu du temps relatif par l'équation du temps. Car les jours naturels sont inégaux, quoiqu'on les prenne communément pour une mesure égale du temps, et les astronomes corrigent cette inégalité, afin de mesurer les mouvements célestes par un temps plus exact.*» «*Il est très possible qu'il n'y ait point de mouvement parfaitement égal, qui puisse servir de mesure exacte du temps; car tous les mouvements peuvent être accélérés et retardés, mais le temps absolu doit toujours couler de la même manière.*»

Certes, la réduction mathématique du temps était une opération parfaitement conforme au plus puissant des courants de la pensée grecque de l'Antiquité. «*Ἄγεωμέτρητος μηδὲς εἰσὶτω*»: «Que nul n'entre ici qui ne soit géomètre», rappelait, selon la tradition, une inscription aux portes de l'Académie d'Athènes. Or, dans la mesure même où Galilée, dès le début de ses recherches à Pise, se montre résolument et passionnément antiaristotélicien, il ne manque jamais de se réclamer de l'autorité du génie platonicien d'Archimède qu'il n'a cessé d'admirer profondément (... «*quem nunquam absque admiratione nomino*»)... Et l'on ne saurait nier la résonance platonicienne de cette véritable profession de foi de Galilée dans le «*Saggiatore*»:

«*L'Univers ne peut se comprendre si l'on n'a préalablement appris à en parler la langue et à en connaître les caractères employés pour l'écrire. Or ce livre est écrit dans la langue mathématique, ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques, sans l'intermédiaire desquels il est impossible d'en comprendre humainement un seul mot.*»

Mais la conversion mathématique du temps opérée par Newton entraînait avec elle quelque chose de totalement étranger aux traditions de la pensée grecque antique: il s'agit de l'abandon du temps *cyclique* auquel l'auteur des *Principes* substitue un temps *linéaire*. Certes, on a pu déceler chez Platon l'idée d'un progrès historique ou mécanique, mais ce progrès a lieu «dans le temps des dieux», «en imitant l'éternité». «Le temps linéaire, c'est la mort du temps», dit en substance l'auteur du *Phédon*, et «même pour l'homme, le temps est cyclique dans la mesure exacte où le divin l'emporte sur le matériel». Ainsi se trouvait profondément enracinée chez les Grecs l'intuition d'un temps cyclique, intuition conti-

nuellement confirmée par les changements multipériodiques du ciel, de la biosphère terrestre et de la voûte étoilée.

Là gît vraisemblablement la raison pour laquelle l'idée d'un temps universel et linéaire comme le temps absolu de Newton ne put voir le jour au sein de l'ancien monde gréco-romain, pas plus à Samos qu'à Athènes, pas plus à Syracuse qu'à Alexandrie.

Mais alors se pose la question: face à cette intuition profonde d'un temps cyclique, d'où vint la *libération* qui, quelques dix siècles plus tard, permit à Galilée de pressentir, à Newton d'énoncer de façon explicite, l'existence d'un temps absolu, universel et linéaire? A n'en pas douter, il s'agit là d'une contribution décisive apportée à l'édification de la Science par la pensée judéo-chrétienne. En effet, toute la Révélation, de la Genèse à l'Apocalypse en passant par les Prophètes et les Evangiles, est en quelque sorte portée par un temps linéaire dont elle manifeste les étapes *irréversibles*: la création du monde, la chute d'Adam, le sacrifice unique et parfait du Fils de Dieu sous Ponce Pilate et, enfin, le Jugement dernier. Et c'est précisément à saint Augustin qu'il avait appartenu de confronter en philosophe la révélation chrétienne d'un temps linéaire irréversible aux conceptions gréco-orientales d'un temps de l'éternel retour, sans commencement ni fin, telles que les avaient défendues les néoplatoniciens d'une part, les disciples de Mani d'autre part. On sait la façon brillante dont, une à une, Augustin réfuta les objections de ses adversaires, forgeant notamment pour cela une théorie tout à fait actuelle du temps qui allait non seulement marquer la pensée de la Renaissance, mais aussi diriger tout un courant de réflexion à l'origine même de la Science moderne.

Ainsi paraît-il peut-être moins surprenant que le temps universel et linéaire de la physique moderne ait vu le jour seulement lorsque se trouvèrent réunis chez le même génie de l'abstraction et de la synthèse la foi en un monde soumis au Verbe d'un Dieu créateur et la certitude que cet univers ne pourrait être décrit que par la langue des mathématiques.

3. LE TEMPS DE LA PHYSIQUE

Ayant rappelé les circonstances qui présidèrent aux naissances simultanées de la physique moderne et du *temps* qui est le sien, il faut maintenant tenter de suivre les métamorphoses principales du concept fondamental introduit par Newton et Galilée. Il s'agit si possible de découvrir les faces les plus significatives d'une notion à la fois maîtresse et mouvante des sciences physiques.

3.1 LE TEMPS DE LA MÉCANIQUE NEWTONNIENNE

Avec l'espace absolu, le temps absolu fournit à la Mécanique classique ce que l'on peut appeler *son cadre cinématique*. Il s'agit de la réunion de deux *continus* mathématiques – l'un à trois dimensions, l'autre à une seulement – sous-tendant l'ensemble de l'univers, à la fois dans son extension visible et dans son histoire, enregistrée et anticipée.

En effet, à côté des propriétés *d'universalité et de linéarité* du temps absolu déjà mentionnées tout à l'heure, il en est une autre, tout aussi fondamentale, et sur laquelle Newton n'a pas manqué d'insister aussi : c'est la *continuité*. Là encore, il s'agit d'un aspect du temps que les anciens Grecs avaient certes pressenti, mais qu'ils n'avaient jamais dominé. Si le problème de la continuité du temps et de l'espace fut posé – au moins implicitement – par Zénon d'Elée dans les célèbres apories de la flèche et d'Achille poursuivant la tortue, les mathématiciens grecs, méfiants, hésitèrent à l'attaquer de front. A ma connaissance, c'est encore Newton qui, l'un des premiers, abandonna les spéculations générales sur les « quantités évanescentes » et la fastidieuse « méthode d'exhaustion » pour oser se servir, *systématiquement et directement*, des infiniment petits dans la preuve de ses théorèmes. Fondée sur la seule propriété qu'à la force gravifique de passer par un centre fixe, l'élégante démonstration de la loi des aires donnée par l'auteur des *Principes* est à cet égard exemplaire.

Dans le cadre cinématique de l'espace-temps continu newtonien, les systèmes physiques évoluent selon les *lois du mouvement*, relations dont nous avons vu qu'elles sont *invariantes* dans cet espace-temps, c'est-à-dire vérifiées en tout lieu, en tout temps et pour tout observateur *inertial*, ce qui signifie pour tout observateur *en mouvement rectiligne uniforme par rapport aux étoiles fixes*. Particularisant quelque peu son point de vue en se limitant comme le fit Hamilton aux *systèmes isolés*, le théoricien moderne préfère déduire cette invariance des équations du mouvement à partir de deux hypothèses très générales et relatives au cadre cinématique de la mécanique : d'une part *l'homogénéité et l'isotropie* de l'espace, et d'autre part *l'uniformité* du temps (le temps coule « uniformément » disait Newton). Ce faisant, le physicien d'aujourd'hui porte de préférence l'accent sur l'invariance des données concernant le *système d'observation ou référentiel inertial*, invariance relative aux groupes continus des transformations possibles de ce système. Ces transformations sont : d'une part celles dans *l'espace*, qui laissent constantes la *distance* entre deux points, savoir les translations et les rotations, et d'autre part les translations dans *le temps*, qui ne changent pas la *durée* entre deux événements. Ces invariances entraînent elles-mêmes sans autre hypothèse que la continuité l'existence des trois constantes du mouvement attachées à tout système isolé : la quantité de mouvement, le moment cinétique et l'énergie.

Mais, sous la forme admirable que sut leur donner Hamilton – forme qui exclut toutefois certaines actions particulières comme *le frottement* –, les équations de la Mécanique classique ne tardèrent pas à réserver une surprise aux physiciens : il est en effet une autre invariance fort singulière de ces équations du mouvement qui d'abord apparut comme donnée par surcroît. De quoi s'agit-il ? Eh bien, si dans les équations du mouvement de la Mécanique classique il prenait à quelqu'un la fantaisie de substituer partout à la variable du temps t la variable opposée « moins t », il constaterait que, toutes simplifications faites, rien n'est changé du tout. L'interprétation physique qui peut être donnée de l'invariance observée par rapport à cette transformation – appelée *symétrie* ou *inversion* par rapport au

temps – est la suivante: tout se passe comme si les lois du mouvement d'un système mécanique étaient indifférentes au *sens* de l'écoulement du temps.

Prenons l'exemple de notre système solaire: si, à un instant donné, il était possible sans en changer la valeur absolue de renverser brusquement et simultanément le *sens* des vitesses de tous les points de ce système – soleil, planètes, comètes, satellites, astéroïdes –, nous le verrions évoluer à rebours et repasser par tous ses états mécaniques antérieurs, exactement dans l'ordre de succession inverse et avec les vitesses opposées.

Si insolite qu'en soit l'interprétation, cette propriété de *réversibilité par rapport au temps* des équations de la Mécanique classique se révèle de la plus haute importance pour la physique. J'y reviendrai.

3.2 LE TEMPS DE LA MÉCANIQUE RELATIVISTE

Mais il faut maintenant parler de la modification spectaculaire apportée au cadre cinématique de la Mécanique classique, suite aux importantes expériences effectuées vers la fin du siècle passé sur la propagation de la *lumière et des ondes électromagnétiques*. Comme le montra Einstein, la façon la plus simple de rendre compte de ces expériences cruciales fut de reconnaître à la vitesse de la lumière et des ondes électromagnétiques *dans le vide* une valeur *constante*, indifférente aussi bien au mouvement rectiligne uniforme du système émetteur qu'à celui du référentiel d'observation. Du même coup se trouvait fondamentalement modifiée la structure de l'espace temps newtonien. En effet, les deux groupes continus de transformations dans l'espace et de translation dans le temps se trouvaient fondus en un seul groupe plus vaste et plus complexe, le fameux groupe continu de Lorentz–Poincaré, noyau de la *théorie de la relativité restreinte*, et dont les transformations manifestent la propriété caractéristique de laisser invariante précisément *la vitesse de propagation dans le vide de ce phénomène fondamental qu'est la lumière*. C'est ainsi que cette vitesse apparaît en même temps comme la limite supérieure des vitesses de propagation de l'énergie, sous quelque forme que ce soit.

Le cadre cinématique ainsi obtenu est une généralisation du cadre newtonien en ce sens qu'il suffit pour retrouver ce dernier d'y considérer la vitesse limite de la lumière comme infiniment grande. Toutefois, l'unification de l'espace avec le temps réalisée par Einstein devait se payer fort cher. Il ne s'agissait de rien d'autre que des abandons simultanés de *l'espace absolu et du temps absolu*, en ce sens qu'aussi bien la distance entre deux points que l'intervalle de temps entre deux événements perdaient la propriété d'invariance que leur avait spontanément reconnu l'intuition newtonienne, pour devenir fonction de la vitesse relative du référentiel d'observation.

Par suite de la valeur très élevée de la vitesse de la lumière dans le vide par rapport à la plupart de celles des systèmes naturels, ces abandons devaient il est vrai se traduire le plus souvent par de très petites déviations quantitatives dans les mesures. Mais cela n'enlevait rien au caractère dramatique de la revision demandée par la physique relativiste à la repré-

sentation que, depuis deux siècles l'intuition newtonienne s'était peu à peu construite du déroulement des phénomènes naturels dans l'espace et dans le temps.

C'est ainsi que certaines conséquences apparemment inéluctables de cette revision ont mis beaucoup de temps pour être généralement reçues; la plus notoire est peut-être celle connue sous le nom de paradoxe «des horloges» ou des «jumeaux de Langevin». Bien qu'il trouve sa résolution complète seulement dans le cadre plus large offert par une théorie généralisée aux référentiels accélérés, les racines de ce fameux paradoxe plongent jusqu'en les fondements mêmes de la relativité restreinte. Imaginons deux jumeaux univitellins dont l'un, Constant, déteste les voyages et ne sort jamais de chez lui, et dont l'autre, Viator, se trouve au départ d'un long périple utilisant des véhicules à très grandes vitesses. Admettons qu'au moment de se quitter, nos jumeaux synchronisent soigneusement leurs montres éphémérides, que nous supposons invariables et parfaites dans leur mouvement. Imaginons enfin qu'au temps des retrouvailles, longtemps après la séparation, ils aient l'idée de comparer leurs montres: eh bien, s'ils ne sont pas gens avertis des mystères de la relativité, nos jumeaux auront la surprise de constater un retard de la montre de Viator sur celle de Constant, retard qui dépendra des vicissitudes auxquelles aura été soumise la vitesse de déplacement de Viator au long de son voyage. Suivant celles-là, le retard pourrait être de plusieurs années. Ainsi, et dans la mesure où les horloges que sont les atomes et les molécules dont nous sommes faits satisfont aux hypothèses – il est vrai très strictes – du physicien relativiste, nos jumeaux univitellins pourraient au moment du revoir apparaître fort différents: l'un, Viator, serait encore dans la force de l'âge, tandis que Constant aurait déjà subi des ans l'irréparable outrage! En physique relativiste, on le voit, si les voyages ne forment pas nécessairement la jeunesse, du moins ont-ils le mérite de la conserver!

Il est une autre conséquence d'ordre général que l'on a voulu tirer de la théorie de la relativité restreinte: il s'agit de la prétendue *spatialisation du temps*, ou encore de *l'équivalence du temps avec l'espace*. Selon les tenants de cette idée, la fusion des groupes de transformation spatiaux et temporels réalisée par le groupe de Lorentz entraîne une équivalence entre chacune des dimensions de l'espace et le temps, et cette équivalence serait confirmée par l'existence d'une représentation très généralement adoptée par les physiciens et qui porte le nom de Minkowski.

Cette représentation utilise un hyperspace à 4 dimensions, le temps venant s'ajouter aux 3 dimensions conventionnelles de l'espace proprement dit. Elle met en évidence la *structure* topologique de l'espace-temps liée à un observateur à la fois parfaitement *localisé* et strictement *instantané*. C'est ainsi qu'à cet observateur ponctuel et éphémère, représenté par un *point* à l'origine commune des axes temporel et spatiaux, l'espace-temps – dont chaque point représente un événement – apparaît distribué en trois domaines distincts: d'abord un *premier hypercône* de révolution dont la base serait donnée par tout *l'espace* aux temps les plus anciens et dont le sommet coïnciderait avec l'observateur origine: c'est le *cône* dit du

passé, constitué par l'ensemble des événements *antérieurs* à l'observateur instantané, c'est-à-dire qui auraient pu se signaler à lui, compte tenu de la vitesse limite de propagation de la lumière : puis *un second hypercône* de révolution, symétrique au premier par rapport à l'observateur origine avec lequel coïncide aussi son sommet, et dont la base serait cette fois donnée par tout l'espace aux temps les plus lointains dans l'avenir : c'est le *cône du futur*, constitué par l'ensemble des événements *postérieurs* à l'observateur instantané, c'est-à-dire auxquels ce dernier pourrait se signaler. Quant à la troisième région restante, elle comprend tous les événements qui, suivant la vitesse du référentiel occupé par l'observateur ponctuel et éphémère, pourraient lui être considérés comme *simultanés* : pour cette raison, ce dernier domaine s'appelle le *présent-ailleurs*. Les 3 régions, toutes d'un seul tenant, sont limitées par une hypersurface, celle des cônes du passé et du futur. Cette surface porte le nom de *cône de lumière*, parce qu'elle est formée de l'ensemble des événements qui dans le passé auraient pu *lumineusement* se signaler à l'observateur origine et de ceux auxquels cet observateur pourrait faire parvenir un signal lumineux dans le futur.

Si sommaire soit-elle, la description qui vient d'être esquissée suffit à montrer que la fusion du temps et de l'espace réalisée par la relativité n'est en rien assimilable à *une identification du temps avec l'espace*. Bien au contraire, la structure topologique de l'espace-temps tel qu'il apparaît à l'observateur ponctuel et éphémère dans la représentation de Minkowski consacre de la manière la plus définitive *l'irréductibilité* de l'espace au temps : c'est ainsi que d'une part l'échange d'un axe spatial avec l'axe du temps bouleverserait complètement cette structure et que d'autre part les symétries opérées par rapport à l'observateur origine sur l'espace ou sur le temps ont des résultats tout différents : tandis que *la symétrie par rapport à l'espace* ne touche pas la structure en domaines du cadre cinématique offert par la relativité, *la symétrie par rapport au temps* échange les cônes du passé et du futur. A ce propos, il est intéressant de noter que, si importantes soient-elles, les modifications apportées par la Relativité à la Mécanique hamiltonienne n'ont rien changé à la bizarre propriété des lois du mouvement d'être indifférentes au sens de l'écoulement du temps : celles-là sont aussi réversibles par rapport à lui dans la Mécanique classique *relativiste*. Cette dernière propriété conduit à penser que si la Mécanique relativiste réalise la fusion de la Mécanique newtonienne avec l'Electromagnétisme et toute l'Optique, son cadre est insuffisant pour décrire sans hypothèse supplémentaire l'ensemble des phénomènes naturels dont l'explication constitue un des objets de *la Thermodynamique*.

3.3 LE TEMPS MACROSCOPIQUE DE LA THERMODYNAMIQUE

Et c'est le moment de rappeler que, malgré ses surprenantes réussites – je pense à la célèbre détermination par Leverrier de la position dans l'espace-temps de la planète Neptune alors inconnue des astronomes –, la Mécanique classique – newtonienne ou relativiste – souffre sous sa

forme hamiltonienne d'un défaut qui touche en plein le problème du temps. Il s'agit notamment de la description des systèmes isolés pour lesquels la Mécanique prévoit des *mouvements périodiques*, c'est-à-dire se répétant indéfiniment au cours du temps, comme celui de la lune autour de la terre. Comme les facteurs d'horloges le savent bien, aucun système *isolé* ne suit un mouvement parfaitement périodique... il existe toujours une dissipation de l'énergie mécanique, due notamment aux forces de frottement. Perdue pour le mouvement, cette énergie dissipée – que les horlogers compensent par le travail extérieur du remontoir ou du moteur –, ne disparaît pas, mais se transforme spontanément en une autre plus subtile, appelée énergie *interne* et qui dépend essentiellement d'une grandeur étrangère à la Mécanique, la *température*. C'est précisément le but premier de la Thermodynamique que de compléter ici la description insuffisante donnée des phénomènes naturels par la Mécanique.

D'une façon générale, la Thermodynamique décrit l'ensemble des phénomènes au cours desquels les systèmes physiques échangent leur énergie non pas seulement par *travail*, c'est-à-dire selon les voies de la mécanique, mais aussi par transfert de *chaleur*, soit au cours de processus dont la description complète fait nécessairement intervenir des grandeurs extra-mécaniques dont la plus élémentaire est précisément *la température*. On le sait: pour l'essentiel, la Thermodynamique repose sur deux principes qui prolongent et complètent les lois de la Mécanique.

Le premier principe de la Thermodynamique étend la conservation de l'énergie au cas des systèmes *isolés*, moyennant la généralisation suivante: l'isolation du système ne doit pas seulement exclure tout échange de *travail*, mais aussi tout *transfert de chaleur* entre l'extérieur et le système. En ceci comparable aux lois de la Mécanique, le premier principe de la Thermodynamique est *indifférent au sens de l'écoulement du temps*, propriété qu'il partage d'ailleurs avec tous les principes de conservation.

Il en va tout autrement *du second principe de la Thermodynamique* qui, lui, affirme au contraire *l'unicité du sens d'évolution des phénomènes physiques dans le temps*.

Considérons premièrement une montre privée de son remontoir et placée dans une bouteille thermos: c'est un système thermodynamiquement isolé. Au bout d'un temps suffisamment long la montre s'arrête, l'énergie mécanique s'étant entièrement dissipée en énergie interne, dont l'augmentation pourrait être indirectement décelée par la montée légère d'un thermomètre de haute précision. On n'a jamais observé que spontanément la montre isolée se refroidisse pour reprendre sa marche.

Pensons maintenant à la tasse de thé ou de café trop chaude qu'il faut se hâter de boire chaque matin. Afin de l'avaler sans se brûler, il suffit d'attendre: jamais il n'est arrivé que spontanément la tasse se réchauffe au dépend de l'atmosphère ambiante!

Ces deux exemples ne sont pas *singuliers*: ils manifestent au contraire cette propriété, *commune* à tous les phénomènes naturels macroscopiques, d'évoluer dans un sens bien déterminé, propriété que le second principe a pour tâche de formuler de façon utilisable non seulement pour le phy-

sicien, mais aussi pour l'ingénieur et le philosophe. Tout se passe comme si, dans l'alternative ouverte par le premier principe, la nature ne choisissait jamais qu'une seule des possibilités d'évolution, et toujours la même. Il fallut longtemps aux physiciens pour construire la grandeur physique qui, fonction de l'état du système, permette de traduire univoquement cette tendance à la fois uniforme et universelle. Et même si *l'entropie* demeure, aujourd'hui encore, une manière de *pont aux ânes* pour les étudiants en physique, il faut reconnaître qu'elle permet une formulation remarquablement simple du second principe: *l'entropie* d'un système *isolé* croît continuellement vers un maximum jusqu'à ce que soit atteint l'équilibre: *maximale, l'entropie reste alors constante*. Qu'est-ce à dire sinon que la Physique est ici parvenue à construire, pour n'importe quel système, une grandeur qui porte en soi la *flèche du temps*: en effet, dans le cas où ce système est isolé, son entropie peut servir à mesurer son âge qui, comme elle, croît toujours. Une fois l'équilibre atteint, l'entropie cesse de croître, il est vrai; mais alors, devenu immuable, le système n'a plus d'âge: il est passé du temps à l'éternité!

La Thermodynamique et ses principes – on l'a rappelé – ne s'appliquent qu'aux phénomènes macroscopiques, par opposition à tous ceux que la prodigieuse instrumentation de la Physique moderne permet d'observer à l'échelle du *noyau* et de *l'atome*.

3.4 LE TEMPS MICROSCOPIQUE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

On sait en effet que pour décrire ces phénomènes microscopiques, il a fallu forger une théorie nouvelle, *la Mécanique quantique*, dont son aînée classique ne constitue qu'un cas singulier. Toutefois, et ceci est important en ce qui concerne le temps, *la Mécanique quantique* n'a pas, jusqu'à ce jour, éprouvé la nécessité de modifier le cadre cinématique classique qu'elle utilise, selon la situation, dans ses deux versions newtonienne ou relativiste. C'est ainsi que la description quantique assigne encore à tout système isolé les 3 constantes du mouvement classique, savoir la quantité de mouvement, le moment cinétique et l'énergie. La profonde modification apportée par la Mécanique quantique porte bien plus sur la description de l'état du système à *un instant donné* que sur l'évolution de cet état au cours du temps. Quant à l'origine même de cette modification, elle réside, on le sait, dans l'action perturbatrice exercée par l'appareil de mesure sur le système microscopique observé et c'est en partie pour rendre compte de cet effet que Heisenberg énonça les relations fixant au produit des incertitudes de deux grandeurs conjuguées du système une valeur *minimale*, donnée par la constante de Planck; que cette constante s'évanouisse et l'on retrouve la Mécanique classique.

Toutefois, si fondamentales soient-elles, les relations de Heisenberg ne rendent compte que de façon incomplète du drame qui se joue au moment d'une mesure sur un système microscopique. En effet, cette mesure provoque en général un *imprévisible* changement d'état non seulement de l'appareil de mesure mais aussi du système.

Une façon simple de tenir compte de cette situation est de faire corres-

pondre à chaque état du système une fonction résumant les éléments de connaissance acquis sur lui par l'observateur. Cette fonction, dite *fonction d'onde* ou de *Schrödinger*, porte une information de nature *probabiliste* en ce sens qu'elle permet d'attribuer une probabilité déterminée au résultat de la mesure de toute grandeur liée au système. L'évolution de la fonction d'onde est donnée par une équation de mouvement de type classique – dite de Schrödinger –, et qui détermine univoquement la façon dont changent ces probabilités au cours du temps, pour autant que le système soit isolé, *et notamment pour autant qu'on n'y effectue pas de mesure*.

Nous touchons ici du doigt un des points les plus discutés de la Mécanique quantique, un point qui concerne directement le rôle qu'y joue le temps. Tout se passe comme si l'état du système y subissait deux types de changement: *le premier*, du genre classique comme nous l'avons déjà annoncé, est commandé par l'équation de Schrödinger et permet de prévoir avec précision l'évolution des probabilités attachées aux résultats des mesures à effectuer sur le système; *le second*, essentiellement aléatoire, hors du temps sinon réversible, préside au drame de la mesure d'une grandeur du système; toute fondamentale qu'elle soit, cette mutation particulière semble échapper entièrement à la théorie, un peu comme les circonstances qui conduisent une cartomancienne *honnête* à tirer de son jeu telle carte plutôt que telle autre échappent au calcul des probabilités dont les règles sont pourtant applicables à l'ensemble de tous les tirages! Cette dualité, peu réjouissante aux yeux de bien des physiciens, paraît profondément enracinée d'une part dans le caractère probabiliste de la fonction l'état du système et d'autre part dans la forme classique des lois du mouvement *isolant* le système afin de le bien décrire.

Voyons ce dernier point de plus près: à tout instant, la Mécanique quantique remplace le résultat de la mesure classique d'une grandeur physique par ce que l'on appelle *l'espérance mathématique* de cette grandeur relative à l'état du système. Il s'agit là d'une moyenne pondérée de tous les résultats possibles que donnerait un grand nombre de mesures, à effectuer chacune sur un exemplaire du système se trouvant dans le même état. Cette espérance mathématique dépend de l'état du système. Elle dépend aussi, c'est nécessaire, de la grandeur à mesurer. Comment? Par l'intermédiaire d'un opérateur particulier appelé *observable* et qui correspond de façon quasi-univoque à la grandeur classique. Cela dit, les équations du mouvement de la Physique quantique peuvent se déduire de la proposition générale suivante: *à des termes multipliés par la constante de Planck près, les espérances mathématiques suivent les équations du mouvement des grandeurs classiques correspondantes*. Ce *Principe de correspondance des mouvements* montre que les lois de l'évolution quantique n'offrent rien de fondamentalement nouveau par rapport à la Mécanique classique – comme pouvait le faire prévoir le maintien du cadre cinématique newtonien ou relativiste –, et que les deux théories souffrent du même défaut de ne traiter effectivement que des systèmes *isolés*. Par ailleurs, selon que l'on rejette la dépendance temporelle entièrement sur l'état du système ou sur les observables représentant

les grandeurs physiques, on obtient à partir du principe de correspondance les deux formes les plus utilisées des équations du mouvement de la Physique quantique: *la forme de Schrædinger*, dans laquelle les observables restant fixes, la fonction d'état évolue suivant l'équation du même nom – nous avons déjà mentionné cette équation d'évolution – ou *la forme de Heisenberg*, caractérisée par l'invariabilité de l'état du système au cours du temps, alors que, portant tout le poids de l'évolution, les observables suivent formellement les équations du mouvement des grandeurs classiques. Considérées généralement comme équivalentes, ces deux formes possèdent toutes deux leur analogue en Mécanique classique.

Si la Physique quantique *non* relativiste a connu et connaît encore de brillantes confirmations expérimentales – notamment dans la description de l'état solide de la matière –, il est évident que, d'un point de vue fondamental, *seule une théorie à la fois quantique et relativiste* peut espérer rendre compte d'une façon satisfaisante de l'ensemble des phénomènes microscopiques où les particules fondamentales se déplacent fréquemment à des vitesses voisines de celles de la lumière. La forme à ce jour la plus satisfaisante de cette Mécanique quantique relativiste est *la théorie des champs quantifiés* qui permet de suivre de la façon la plus cohérente possible les réactions entre particules fondamentales où, comme il est bien connu, ces *éléments de matière* à ce jour tenus pour ultimes non seulement se transforment les uns dans les autres, mais sont sujets aux singuliers phénomènes d'annihilation et de création. Implicitement, les lois du mouvement de la théorie des champs quantifiés satisfont aussi au Principe de correspondance des mouvements. Encore une fois, les nombreux et patients perfectionnements apportés aux théories quantiques n'ont jusqu'ici rien touché au cadre cinématique fixé par Einstein à la physique contemporaine et, à ce jour, aucune expérience en la jungle microscopique, même parmi celles qui mettent en jeu les plus hautes énergies, ne donne à penser qu'il soit nécessaire de remanier ce cadre consacrant la prééminence du groupe continu de Lorentz.

C'est ainsi que les lois du mouvement quantique devraient présenter les mêmes propriétés d'invariance que leurs correspondantes classiques par rapport aux symétries: nous avons mentionné parmi celles-ci la *réversibilité* – c'est-à-dire l'invariance par rapport à un *renversement du sens de l'écoulement du temps*. Il y a une dizaine d'années, la plupart des physiciens estimait que les lois du mouvement quantique devaient en outre satisfaire à deux autres invariances: il s'agit d'une part de la *réflexibilité*, c'est-à-dire de l'invariance par rapport à la symétrie *gauche-droite* (c'est l'opération qui, notamment, échange un objet avec son image donnée par un miroir-plan), et d'autre part de l'invariance par rapport au *changement de signe des charges électriques* (opération qui, par exemple, échange un électron pour un positon). Ces conjectures ont été démenties par les faits: dans leur ensemble, les réactions entre particules fondamentales ne satisfont ni à l'invariance par rapport à la symétrie gauche-droite, ni à celle par rapport au changement de signe des charges électriques. Quant à *l'invariance par rapport au renversement du sens d'écoule-*

ment du temps, de vérification fort délicate, l'expérience microscopique ne l'a pas encore mise en défaut de façon irréfutable, cela en dépit des importantes restrictions prévues par les physiciens aux propriétés d'invariance offertes par les meilleurs modèles actuellement mis à leur disposition par la théorie des champs.

3.5 LE TEMPS DE LA MÉCANIQUE STATISTIQUE

C'est ici que surgit une difficulté déjà reconnue depuis longtemps: d'une part, il s'avère que les lois de la Physique microscopique sont indifférentes à un renversement du sens d'écoulement du temps: et d'autre part, nous l'avons rappelé, la Thermodynamique, consacrant l'irréversibilité manifeste des phénomènes macroscopiques, affirme au contraire que les lois décrivant l'évolution des systèmes à l'échelle du laboratoire ne sont pas invariantes par rapport à ce renversement du temps. N'y a-t-il pas là contradiction, dans la mesure où un système *macroscopique* ne saurait être autre chose qu'un assemblage de systèmes *microscopiques*? C'est à la *Mécanique statistique* qu'il appartient de résoudre cette aporie moderne. Il y a un siècle déjà que Boltzmann tentait de lui donner une solution. Dans ce but, il raisonnait sur le modèle simple d'une masse de gaz – c'est le système macroscopique – constituée d'un nombre immense de molécules identiques – ce sont les systèmes microscopiques. Soumis à de violentes critiques – n'oublions pas qu'il vivait à une époque où les atomes n'étaient qu'hypothèse –, Boltzmann ne cessa de remanier sa démonstration du fameux *théorème H* qui, dans le cas particulier de la masse de gaz isolée, tente de déduire le principe de l'entropie croissante à partir de la statistique des mouvements, réversibles mais désordonnés, de la foule des molécules constituant le gaz. Réduite à l'essentiel cette démonstration de l'irréversibilité, marche à l'équilibre des systèmes thermodynamiques, se fonde sur deux propositions préalables. Premièrement: *la réversibilité de la mécanique régissant le très grand nombre de systèmes élémentaires composant le système macroscopique*. Secondement une hypothèse accessoire, étrangère à la théorie microscopique, et dont *la caractéristique essentielle est de porter sur des probabilités, ce qui de facto entraîne l'irréversibilité*. Dans le modèle envisagé par Boltzmann, l'hypothèse accessoire concernait le nombre probable de collisions encourues, pendant un intervalle de temps défini, par les molécules d'une certaine vitesse et se trouvant dans un volume donné. Les démonstrations modernes du théorème H se fondent encore toutes sur l'existence, pour les systèmes microscopiques, d'équations de mouvement qui sont réversibles. Toutes aussi font usage du nombre très élevé de systèmes élémentaires constituant le système macroscopique. Enfin à ce jour, toutes ces démonstrations sont, comme celle de Boltzmann, obligées de faire appel à une hypothèse accessoire de nature probabiliste *qui explicitement introduit l'irréversibilité*; celle-ci ne résulte donc pas simplement – comme on l'a quelquefois avancé – du fait que le système macroscopique est composé d'un très grand nombre de systèmes élémentaires. C'est ce que tient encore à préciser la remarque suivante:

sous certaines réserves, l'hypothèse accessoire probabiliste peut être réduite à une sorte de *condition initiale ou asymptotique* qui, faite à un seul instant, sélectionne de façon judicieuse les solutions des multiples équations de mouvement des systèmes microscopiques. Or, *la réversibilité par rapport au temps de ces dernières permet d'associer à la condition initiale accessoire assurant l'irréversibilité de l'évolution macroscopique une autre condition qui lui est symétrique par rapport à l'origine des temps*. Substituée à la première, cette condition symétrique assignerait au macrosystème une évolution irréversible encore, *mais tournée vers le passé au lieu du futur*. Probablement sans interprétation physique, cette possibilité manifeste toutefois de façon très nette non seulement *la nécessité* d'une hypothèse accessoire aux lois microscopiques, mais aussi *le rôle décisif* joué par cette hypothèse dans l'obtention d'une évolution irréversible pour le système macroscopique.

Ainsi se trouvent reliés, sinon réconciliés, *le temps réversible* de la physique à l'échelle des atomes et *l'irréversible évolution* des phénomènes que nous vivons.

3.6 LE TEMPS DE LA COSMOLOGIE

Toutefois, dans le désir de comprendre toute la Nature dans ses théories, la Physique moderne ne s'est pas contentée de descendre vers les structures élémentaires constitutives de la matière. Guidée par le génie de Newton, elle a dès ses débuts voulu connaître le monde dans son ensemble. Cependant, longtemps privée des instruments indispensables pour ordonner l'univers, la Physique n'a guère commencé de réunir les éléments d'une «cosmologie» digne de ce nom que depuis une cinquantaine d'années à peine. C'est ainsi que du côté de l'expérience, il est aujourd'hui possible de discerner les premiers indices de structures dans la répartition de la matière au sein de l'univers: systèmes planétaires, amas d'étoiles, galaxies, amas de galaxies. Par ailleurs, les expérimentateurs ont aussi mis en évidence une apparente expansion de notre monde, celle-ci prenant l'allure du bouquet final d'une gigantesque explosion dont les déchets, amas de nébuleuses aux dimensions défiant l'imagination, semblent s'éloigner de nous d'autant plus vite qu'ils sont plus lointains. Du côté des théoriciens, les progrès ont été tout aussi remarquables: faisant plein usage des vues profondes avancées par Einstein dans sa théorie de la relativité générale – théorie qui, on le sait tient la gageure de réduire le phénomène de la gravitation à une déformation du cadre cinématique offert par la relativité restreinte – les physiciens ont pu de notre univers forger des modèles qui non seulement relient entre eux la plupart des faits d'expériences mentionnés tout à l'heure, mais qui les inscrivent de façon cohérente dans le cadre général des lois de la physique. Tout en reconnaissant au monde la propriété rassurante pour l'intuition newtonienne d'être sans frontières, les modèles les plus satisfaisants proposés par les cosmologistes contemporains lui assignent des dimensions *finies*. Par ailleurs, confirmant de façon plus ou moins inattendue l'allure explosive de notre univers, les plus recevables parmi ces modèles lui attribuent un âge, res-

pectable il est vrai, mais dont l'ordre de grandeur est tout de même bien défini: *dix milliards d'années environ*.

La naissance du monde coïnciderait ainsi avec le début de l'explosion, moment où toute la matière de l'univers – atomes, molécules, planètes, soleils et galaxies – devait être concentrée dans une seule masse de densité fantastique, *l'atome primitif*. Mais, demandera-t-on, que devient le temps dans ce cataclysme à rebours qui enfanta notre monde? Le temps de la Physique, ce temps que nous avons vu naître dans la pensée de Galilée et de Newton, n'est-il pas illimité?... ne s'écoule-t-il pas uniformément du profond gouffre de la nuit des temps passés jusqu'à l'insondable obscurité du futur? Face à ces questions qui l'assaillent, le physicien ne peut répondre qu'en physicien: la description à ce jour la plus cohérente de tout ce que l'expérience nous a révélé de l'univers physique conduit, en remontant le passé, à fixer une origine à ce monde, c'est-à-dire un moment au-delà duquel il n'est plus possible d'aller sans violer les lois mêmes de la physique. C'est là une limite que cette science est amenée à se donner spontanément.

A première vue, la situation n'est pas nouvelle pour le physicien, et la Thermodynamique lui avait déjà fourni de semblables exemples d'une extrapolation bloquée vers le passé. Imaginons une plaque de métal *isolée* dont la température soit uniforme. Supposons qu'à un instant origine, l'isolation ayant été momentanément supprimée, on porte brusquement un point de cette plaque au rouge, le reste conservant la même température: grâce aux équations de la Thermodynamique, il est possible de prévoir la répartition des températures de la plaque à nouveau isolée pour tout instant *postérieur* à l'instant origine *t*. Mais ces mêmes équations ne permettent pas de connaître les températures de la plaque *avant* l'instant origine. Si l'extrapolation vers l'avenir est possible, celle dans le passé se voit bloquée par une singularité infranchissable. Comme on le voit facilement, cette dissymétrie tient notamment au fait que l'état des températures résulte d'une *action de l'extérieur* sur la plaque, action que ne sauraient décrire les équations donnant l'évolution de la plaque *isolée*.

L'existence d'un *extérieur* pour le système constitué par la plaque est ainsi nécessaire pour rendre compte de l'impossibilité d'une extrapolation vers le passé. Or, *l'univers, lui, n'a pas d'extérieur*, sans quoi il ne serait pas l'univers... englobant toutes choses observables! Le raisonnement invoqué pour la plaque ne s'applique donc plus...

Afin d'illustrer la difficulté fondamentale liée à l'existence d'une origine des temps pour l'univers, considérons l'image suivante: des enfants de tous âges ont décidé de se livrer au jeu dont voici la règle: après que tous se sont serrés les uns contre les autres, l'un d'entre eux, le meneur de jeu, crie «partez!» et chacun s'échappe au plus vite dans *une* quelconque direction. Regardant autour de soi, pendant la course, chacun des enfants aura l'impression de voir les autres filer d'autant plus vite qu'ils sont plus éloignés... Eh bien, remplaçons les enfants par des amas de galaxies dont l'un, appelé «groupe local», contient le système solaire, multiplions leur distance par un facteur contenant un respectable nombre de zéros (24 à

peu près) et nous aurons une vision passable de l'univers tel qu'il nous apparaît de la terre... Gardant maintenant cette représentation à l'esprit, posons-nous la question de tout à l'heure: avant l'explosion de l'atome primitif, que se passait-il donc? Pour nos enfants, cela revient à se demander ce qu'ils pouvaient bien faire avant le début du jeu. On le voit bien: la connaissance la plus précise des règles de ce jeu ne sert de rien pour répondre: nos enfants jouaient peut-être à un autre jeu, ou même, ne jouaient-ils pas du tout! Semblablement, la connaissance la plus précise des lois physiques de notre univers – l'analogue des règles du jeu – ne peut nous donner la moindre certitude sur ce qui se passait «avant» la naissance du monde: peut-être les lois étaient-elles différentes, peut-être n'y en avait-il même pas.

Le physicien n'a donc pas à se soucier des fictions que sont la Physique et le Temps de cet «avant» fondamentalement inconnaissable. Fait remarquable, il y a plus de seize siècles que, répondant à la même question par d'autres voies et sur un autre plan il est vrai, saint Augustin parvenait pour l'essentiel à la même réponse.

3.7 UNE PREMIÈRE CONCLUSION

L'analyse détaillée qui vient d'être donnée des divers aspects de la notion de temps utilisés par la Physique permet, dans une première synthèse, de tirer cette conclusion provisoire:

A ce jour, il est en principe possible de rendre compte, de façon plus ou moins cohérente, d'une évolution de tous les phénomènes physiques aux échelles *microscopique*, *macroscopique* et *cosmique*, grâce à *un seul paramètre* linéaire, continu, irréversible, d'extension limitée dans le passé et illimitée dans le futur. Irréductible aux dimensions de l'espace, ce paramètre, *le temps de la physique*, se trouve toutefois intimement uni à ce dernier pour constituer le cadre cinématique de toutes les sciences physiques. A ce jour encore, il existe un phénomène, la gravitation, qui peut s'interpréter comme une simple déformation macroscopique de ce cadre où les particules fondamentales constituant la matière jouent entre elles un jeu dont les règles semblent indifférentes à l'irréversibilité du temps.

Si provisoire soit-elle, cette première conclusion appelle néanmoins des remarques importantes qui seront l'objet de la dernière partie de cet exposé.

4. LES NOTIONS SATELLITES DU TEMPS EN PHYSIQUE: CAUSALITÉ, CONSERVATION, IRRÉVERSIBILITÉ

Si un effort vers la plus grande objectivité possible paraît de mise, dans l'analyse qui précède et qui cherche à présenter la notion de temps telle que, *de l'intérieur*, l'a construite le physicien, les remarques qui vont suivre ne sauraient se réclamer de la même exigence de rigueur. Elles procèdent plutôt d'un examen fait cette fois *du dehors*, et concernent des

questions de portée plus générale, ressortissant davantage à la méthodologie de la physique qu'à cette science proprement dite.

Pour commencer, il faut s'arrêter quelques instants à *la notion de causalité* et au lien étroit qui, en physique, l'attache au temps. A la richesse souvent déroutante des acceptions que les philosophes anciens et modernes ont ménagé et ménagent au mot de *cause*, la Physique oppose – on le sait – une conception fort restreinte et purement *descriptive* de la notion de causalité, presque totalement dépouillée de contenu métaphysique. C'est ainsi que se fondant sur le cadre cinématique de l'espace-temps et notamment sur sa continuité le physicien peut définir ce qu'il entend par *théorie causale*, en l'opposant à une *théorie anticausale* ou finaliste.

Pour être *causale* une théorie doit en premier lieu admettre à chaque instant l'existence d'une description *complète* de l'état d'un système physique. En second lieu la théorie est causale si l'état *présent* est constamment explicable à partir d'états *antérieurs* du système seulement. Plus précisément, un événement donné ne peut avoir été influencé que par d'autres événements nécessairement tous situés dans son *passé*. Ainsi, une théorie causale s'oppose à une théorie *finaliste* ou *anticausale* qui considèrerait le présent comme en partie conditionné par l'*avenir*. Dans le cas particulier où la connaissance du passé d'un événement quelconque *suffit* à la connaissance complète de cet événement, la théorie est non seulement causale, mais encore *déterministe*. Illustrons ces définitions générales par trois exemples :

Un certain *finalisme* en biologie, selon lequel des formes se développent afin de réaliser tels buts – nécessairement dans l'avenir – est le type d'une théorie anticausale.

Encore en biologie, une théorie comme celle du *transformisme* est par contre une théorie causale en ce sens qu'elle explique une partie de l'état actuel des formes biologiques par l'histoire de ces formes.

Sous sa forme hamiltonienne, la Mécanique classique est enfin une théorie non seulement *causale* mais aussi *déterministe* puisqu'elle permet de prédire de façon complète l'état présent d'un système à partir de la connaissance – complète aussi – d'un seul état antérieur de ce système. Il faut d'ailleurs ajouter que, conséquence inattendue de la réversibilité par rapport au temps des équations du mouvement classique, la Mécanique hamiltonienne peut être aussi qualifiée d'*anticausale* : en vue de la détermination complète de l'évolution du système à partir de ces équations, cette réversibilité veut en effet que le rôle d'un état du passé puisse être échangé avec celui d'un état du futur. Cette situation, paradoxale en apparence seulement, est à l'origine de certaines formulations téléologiques des lois du mouvement classique, le principe de moindre action de Maupertuis ou celui de l'action stationnaire de Hamilton notamment. Cela ne fait d'ailleurs que souligner le défaut fondamental dont souffre la Mécanique classique, et la nécessité de la compléter par une théorie comme la Thermodynamique qui porte en soi la flèche du temps.

Une fois admises les définitions ainsi formulées de causalité et de

déterminisme, il est possible de montrer que, tout comme son analogue classique, la Mécanique quantique qui fonde l'évolution de ses systèmes sur le Principe de correspondance des mouvements est à la fois *causale et déterministe*. Cela pour autant que l'on fasse abstraction du processus de mesure lui-même, processus dont il a déjà été remarqué qu'il restait à ce jour étranger aux formes élaborées de la théorie.

Quant à cette propriété partagée par les Mécaniques classique et quantique d'être déterministes, il n'est pas superflu de souligner qu'elle est en relation étroite avec la structure continue du cadre cinématique commun à ces deux disciplines.

La question de savoir si les jeux encore mystérieux des particules fondamentales peuvent être fidèlement décrits par la Mécanique quantique reste à ce jour encore sans réponse sûre. Face aux obstacles quasi-insurmontables actuellement rencontrés par cette mécanique en microphysique, nombreux sont les physiciens qui vont jusqu'à mettre en question la possibilité pour une théorie décrivant les particules fondamentales d'être causale au sens donné tout à l'heure à ce terme. Considérant d'une part les dimensions extraordinairement petites de ces particules et le temps apparemment infinitésimal que dure leur interaction, et d'autre part l'état d'extrême dilution de la matière à l'extérieur des noyaux, il ne leur apparaît plus indispensable de s'attacher au déroulement détaillé et complet des interactions. Il est suffisant, leur semble-t-il, de substituer aux équations de mouvement un faisceau de relations générales entre l'état *initial* et l'état *final* du système constitué par l'ensemble de particules en jeu. Ces tentatives ont certainement remporté d'indéniables succès. Mais le dessein qu'elles ont de sortir la microphysique du temps – de «l'extemporaliser» pourrait-on dire – paraît à ce jour quelque peu compromis pour les deux raisons que voici : premièrement ces théories utilisent en plein le cadre cinématique continu de l'espace-temps conventionnel ; en second lieu, il n'est pas évident que la «causalité microscopique» à laquelle ces théories se voient obligées de faire appel tout de même ne soit pas en fin de compte équivalente à l'hypothèse d'un déroulement continu des interactions dans le temps.

Une seconde remarque concerne les notions liées et complémentaires *d'évolution et de conservation*, et la manière dont elles s'inscrivent dans la dialectique du temps de la Physique.

Dès la plus haute antiquité, les philosophes qui tentaient de se représenter la figure du monde ont dû faire face à ce dilemme : l'univers est-il immuable ou, au contraire, vit-il un perpétuel changement ? C'est ainsi que dans la Grèce ancienne, l'École de Parménide tenait le cosmos pour statique, tandis qu'Héraclite et ses disciples le voyaient se mouvoir, pareil au gigantesque écoulement d'un fleuve sans commencement ni fin. D'autres opposaient au majestueux temps des dieux, cyclique et éternel, les temps rompus des hommes, misérables lambeaux de l'histoire.

Pour sa part, la Physique moderne n'est pas non plus parvenue à se sortir du dilemme opposant le fixe au mouvant. Il y a bien une interpré-

tation de la théorie de la relativité qui tente de fixer «*sub specie aeternitatis*» tout l'univers, son histoire passée et future, comme une tapisserie déroulée une fois pour toute; un peu à la façon dont certains peintres primitifs ont représenté dans un seul paysage les moments successifs de la chute d'Adam ou de la Passion du Christ. Mais ne paraît-il pas que cette vision quelque peu ambitieuse confond le cadre cinématique de la Physique avec la Physique elle-même, prenant en quelque sorte le lit du fleuve pour le fleuve lui-même? Il faut se rendre à l'évidence: le dilemme est fallacieux en ce sens que le mouvant n'existe que relativement au fixe. La Physique l'a fort bien précisé qui, d'une part fonde toute sa cinématique sur la relativité du mouvement et qui d'autre part oppose aux grandeurs d'évolution décrivant l'histoire du système les paramètres *fixes et les constantes* du mouvement. On a vu comment la Mécanique quantique exploite cette relativité du mouvant jusque dans la diversité des formes données aux équations d'évolution, où liberté est donnée de considérer comme variables dans le temps, soit l'état du système, soit les observables liées à ce système.

De ce point de vue, il n'est pas sans intérêt d'opposer au modèle orthodoxe de l'univers en expansion esquissé tout à l'heure, le modèle tout aussi ingénieux qu'en fournit la théorie dite «*de la création continue*», théorie selon laquelle, malgré les apparences, notre monde serait immuable dans son aspect, et sans origine et sans fin. D'un côté un univers en plein devenir, de dimensions et d'âge finis, mais dont les lois satisfont aux grands principes de *conservation* de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la charge électrique. De l'autre, un monde infini mais stationnaire, régi par des lois où les principes de conservation sont remplacés par des *équations de création* distribuant de façon continue dans tout l'espace-temps cette unique et singulière catastrophe que fut, selon les orthodoxes, la création du cosmos.

Ne peut-on se demander si, d'une part en dépit ou peut-être à cause des observations cruciales que l'astrophysique s'efforce maintenant d'imaginer pour les départager et, d'autre part, sous l'effet des multiples perfectionnements que la technique et la réflexion leur apporteront encore, ces deux modèles ne finiront pas tout de même par s'accorder, donnant deux vues cohérentes et complémentaires d'un monde qui cache encore beaucoup de mystères? Car, en dernière analyse, ce qui distingue essentiellement ces deux descriptions de notre monde, ce n'est pas que dans l'une il soit mobile et dans l'autre fixe, mais seulement la façon dont y sont distribués la permanence et le mouvant.

Revenant à l'image la plus plausible que la physique donne à ce jour de notre univers, il faut constater, et ce sera là ma dernière remarque, que l'intervention quasi-nécessaire d'un *temps cosmique irréversible* pose au physicien orthodoxe une question qu'il ne saurait éluder: les lois de la Physique échappent-elles à cette évolution et, notamment, les constantes universelles de la Nature restent-elles aussi immuables que le supposent ces lois?

Il y a longtemps que les physiciens ont vu ce problème, et les récents progrès de la cosmologie ont déjà permis de construire des théories où, l'une après l'autre, les constantes universelles se mettent à vieillir comme nous! Certes, on peut considérer cette éventualité comme naturelle à toute cosmologie scientifique: c'est ce que tendrait à prouver la multitude des expériences envisagées par les physiciens afin de déceler les plus ténues des variations imaginables pour les constantes universelles. Mais ne voit-on pas que, fondamentalement, il y a bien davantage dans cette soumission possible des lois de la Physique au temps de l'univers?

Il s'agit, ni plus ni moins, d'une véritable mise en question de la Physique par le temps lui-même, ou si l'on veut, *d'une mise en question de la Physique par la Physique elle-même.*

N'avez-vous jamais, au cours d'une de ces promenades sans but que la vie moderne s'entend à rendre de plus en plus rares, n'avez-vous jamais eu le regard arrêté par quelque nuée accrochée à la montagne, perdue dans le bleu transparent d'un ciel d'été? A la regarder attentivement, c'est tout un monde qui s'y agite: ombres, lumières, couleurs, tourbillons et tournoiements se succèdent dans un jeu où bien vite il apparaît manifeste que le hasard n'est pas seul: vous commencez à discerner un semblant d'ordre, des successions, des périodicités, des retours, ... et vous jouez à anticiper sur tel changement, ... vous vous trompez, ... vous avez raison... vous vous surprenez à énoncer des règles: un tourbillon qui disparaît ici fait place à un autre venant de là... peu à peu, vous regardez vos prévisions s'accomplir et déjà vous vous réjouissez de découvrir une Nature qui vous obéit... Et soudain, un sentiment de frais, le temps de laisser courir votre regard à la recherche du vent caressant des herbes en effroi...: la nuée s'est évaporée, entraînant dans le vide du ciel la vanité des promesses que vos théories avaient échafaudées pour son avenir!...

Et notre univers de soleils, d'amas d'étoiles et de galaxies! Malgré ses dimensions et son âge formidables, ne serait-il pas lui aussi, qu'un nuage éphémère aux yeux de je ne sais quel être supérieur au-delà de notre entendement?

Et si c'était le cas, quelle valeur donner à la Physique? et à toute la Science? et à toute la peine des savants? A cette question-là, bien sûr, ce n'est plus au physicien de répondre, mais bien à chaque homme personnellement, à chacun de nous, selon notre foi et selon nos convictions, car manifestement la raison seule n'y suffit plus!

Mais revenons une dernière fois au temps et à la Physique pour tenter de conclure.

5. CONCLUSION: LE TEMPS, GRANDEUR CENTRALE ET SPÉCIFIQUE DE LA PHYSIQUE

Nous l'avons vu, la Physique est née lorsque la Philosophie, se tournant délibérément vers la Nature, céda à la volonté de la décrire dans les faits puis au désir de la maîtriser par ses lois.

Plus que tout autre grandeur de la Physique le temps porte en soi cette origine philosophique, et la réduction mathématique pratiquée sur lui par Newton n'a pu le dépouiller complètement de son épaisseur métaphysique. D'autre part, née avec la physique moderne, la grandeur temps s'est constamment trouvée au cœur des problèmes qui ont jalonné le développement de cette science.

Comment s'étonner dès lors que toute l'histoire de la physique, et ses échecs aussi bien que ses réussites, témoignent du rôle central qu'y a joué et qu'y joue encore le temps. Or ce rôle est double.

D'une part, le temps de la physique révèle au philosophe le mouvement et les *intentions* de l'invention physicienne, par la manière dont cette invention en use avec lui. D'autre part et surtout, le temps tient auprès du physicien le rôle d'une sorte de témoin de la réflexion philosophique. Que l'on considère seulement la multiplicité des propriétés que la physique a successivement ou simultanément attachées au temps : linéarité ou périodicité, continuité ou universalité, irréversibilité ou finitude. N'ont-elles pas eu, toutes ces propriétés, leur correspondant dans la pensée philosophique antique ou médiévale ?

D'ailleurs, cette action du temps auprès de la physique trouve sa contrepartie dans le fait que, pour le temps, la physique joue en quelque sorte le rôle combiné d'un filtre et d'un prisme, purifiant et séparant la plupart des multiples acceptions que la réflexion philosophique avait progressivement accumulées sur le seul mot de *temps*.

Mais le temps n'est pas seulement la grandeur *centrale* de la physique moderne. Qu'on prenne en effet la peine de considérer cette physique en l'opposant d'un côté aux *mathématiques* qui se veulent hors du temps sinon de l'espace, et d'un autre côté aux *sciences biologiques* où le temps n'intervient qu'au travers des phénomènes infiniment plus complexes de la *vie*. Il apparaît alors que le temps doit être aussi tenu pour la *grandeur spécifique* des sciences physiques : n'est-ce pas d'ailleurs ce que faisaient prévoir d'une part la *nécessité* et la *suffisance* du cadre cinématique fourni par l'espace-temps, et d'autre part l'irréductibilité de l'espace au temps de la physique ?

Toutefois, si riche et si multiple, si fascinant même que soit ce temps des physiciens, véritable protégée des sciences physicochimiques, il ne saurait être, rappelons-le, qu'une caricature du temps tel qu'il nous est donné de le vivre !

« Image mobile de l'éternité » enseignait-on à l'Académie d'Athènes... « Prix de la vie éternelle » prêchait-on sous Louis XIV... « *Présent* de l'amour de Dieu suspendant Son jugement pour le salut des hommes » annoncent depuis vingt siècles les Evangiles.

Oui certes, le temps, c'est aussi et surtout cela. Y a-t-il, depuis les sombres jours d'Hiroshima et de Nagasaki, un seul physicien de notre génération qui pourrait l'oublier ?

BIBLIOGRAPHIE

1^{re} partie

St. Augustin: Œuvres. Les Confessions. Livre XI. Desclées de Brouwer, Paris 1962.

2^e partie

St. Augustin: Œuvres; Tomes 1 à 12, notamment les dialogues philosophiques. Desclées de Brouwer, Paris 1948.

Galilée, G.: Il Saggiatore. Opere. Florence 1929.

Inhelder et Piaget: Les structures logiques et élémentaires. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel et Paris 1959.

Kroyre, A.: Etudes galiléennes, Vol. I, II et III. Hermann, Paris 1939.

Platon: Dialogues, et notamment *Théétète*, *Phédon*, *Timée*. Les Belles Lettres, Paris 1936.

Russel, B.: History of Western Philosophy. Allen and Unwi, London 1946.

Vidal-Naguet, P.: Temps des Dieux et temps des hommes. Rev.Hist.Relig. CLVII, I, 5, A (1960).

3^e partie

Adler, R., Bazin, M., Schiffer, M.: Introduction to General Relativity, McGraw-Hill, New York 1965.

Bogoljubov, N.N. and Skirov: Introduction to the Theory of Quantitative Fields, Interscience Publishers, New York 1959.

Boltzmann, L.: Leçons sur la théorie cinétique des gaz. Gauthier-Villars, Paris 1902-1905.

Bondi, H.: Cosmology. Cambridge 1960.

Callen, H.B.: Thermodynamics. Wiley, New York 1960.

Costa de Beauregard, O.: Le second principe de la science du temps. Edition du Seuil, Paris 1963.

La notion du temps. Equivalence avec l'espace. Hermann, Paris 1963.

Dirac, P.A.M.: The Principles of Quantum Mechanics. Oxford 1957.

Dugas, R.: Histoire de la mécanique. Le Griffon, Neuchâtel 1950.

Feymann, R.P.: Quantum Electrodynamics. Benjamin, New York 1962.

Fock, V.: The Theory of Space, Time and Gravitation. Pergamon, London 1964.

Heisenberg, W.: Les principes physiques de la théorie des quanta. Gauthier-Villars, Paris 1922.

Van Hove, L.: Physica 21, 517 (1955). 23, 411 (1957).

Hoyle: Monthly Notices Roy.Astron.Soc. 108, 372 (1948).

Jauch, J.M.: The Problem of Measurement in Quantum Mechanics. Helv.Phys.Acta 37, 293 (1964).

Lemaitre, G.: The Expanding Universe, Monthly Notices Roy.Astron.Soc. 91, 490-501.

Mach, E.: La mécanique. Hermann, Paris 1904.

Newton, L.: Principia Mathematica Philosophae Naturalis. Amsterdam 1714.

Principes mathématiques de la philosophie naturelle, traduction de la Marquise du Chatelet, 2 volumes, Paris 1759.

Pauli, W.: Theory of Relativity. Pergamon Press, London 1958. Festschrift für A. Sommerfeld, 30. Leipzig 1928.

Penrose and Percival: Proceedings Physical Society 79, 605 (1962).

Reymond, A.: Histoires des sciences exactes dans l'antiquité romaine. Presses universitaires de France, Paris 1955.

Rivier, D.: Cours de physique quantique, Université de Lausanne (inédit).

Robertson, H.P.: Kinematics and World Structure Astrophysical, J. 82, 284 (1935).

Schlipp, P.A.: Einstein, A., Philosophic Scientist. Tudor, New York 1949.

- Neuman, von*: Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Dover/New York 1943.
- Schwinger, J.*: Quantum Electrodynamics. Dover/New York 1958.
- Streater, R.F. and Wightmann, A.S.*: PCT, Spin and Statistics and All That. Benjamin, New York 1964.
- Stueckelberg, E.C.G.*: Cours de physique théorique à l'Université de Lausanne 1945–1965 (inédits).
- Un nouveau modèle de l'électron ponctuel en théorie classique. *Helv.Phys.Acta* 14, 51 (1941).
- Remarque à propos de la création de paires de particules en théorie de relativité. *Helv.Phys.Acta* 14, 588 (1941).
- Signification du temps propre en mécanique ondulatoire. *Helv.Phys.Acta* 14, 321 (1941).
- La mécanique du point matériel en théorie de relativité et en théorie des quanta. *Helv.Phys.Acta* 15, 23 (1942).
- Un principe qui relie la théorie de la relativité et la théorie des quanta. *Helv.Phys.Acta* 16, 173 (1943).
- Principe de correspondance d'une mécanique asymptotique classique. *Compte rendu des séances de la Société de Physique et d'Histoire naturelle de Genève* 61, 156 (1944).
- Principe de correspondance d'une mécanique asymptotique quantifiée. *Compte rendu des séances de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève* 61, 159 (1944).
- Un modèle de l'électron ponctuel II. *Helv.Phys.Acta* 17, 3 (1944).
- Causalité et structure de la matrice S (avec Rivier, D.). *Helv.Phys.Acta* 23, 215 (1950).
- Relativistic Quantum Theory for Finite Time Intervals. *Phys.Rev.* 81, 130 (1951).
- Théorème H et unitarité de S. *Helv.Phys.Acta* 25, 577 (1952).
- Thermodynamique en relativité générale (avec Wanders, G.). *Helv.Phys.Acta* 26, 308 (1953).
- Thermodynamique dans un continu, riemannien par domaines. *Helv.Phys.Acta* 26, 26, 418 (1953).
- Acausalité de l'interaction non locale (avec Wanders, G.). *Helv.Phys.Acta* 27, 667 (1954).
- Field Quantification and Time Reversal in Real Hilbert Space. *Helv.Phys.Acta* 32, 254 (1959).
- Tolmann, R.C.*: The Principles of Statistical Mechanics. Oxford 1938.
- Weyl, H.*: Space, Time, Matter. Dover/New York 1950.
- Wigner, E.P.*: The Problem of Measurement. *Amer.J.Phys.* 31, 6–15 (1963).
- Wu, T.Y. and Rivier, D.*: *Helv.Phys.Acta* 34, 661 (1961).
- Zemansky, M.W.*: Heat and Thermodynamics. McGraw-Hill, New York 1957.
- 4^e partie*
- Bondi, H., Bonnor, W.B., Littleton, R.A., Whitrow, G.J.*: Rival Theories of Cosmology. London 1960.
- Reichenbach, H.*: Philosophische Grundlagen der Quantenmechanik. Birkhäuser, Basel 1949.
- Rivier, D.*: Déterminisme et causalité en microphysique. *Bull.Soc.Vaud.Sc.Nat.Lausanne* 66, 20 (1956).
- Weizsäcker, C.F., von*: Komplementarität und Logik. *Naturwissenschaften* 19, 521–529; *ibid.* 20, 545–555 (1955).
- Wightmann, A.S. et al.*: Les problèmes mathématiques de la théorie des quantiques des champs. CNRS, Paris 1957.
- 5^e partie*
- Russel, B.*: History of the Western Philosophy. Allen and Unwi, London 1946.