

Einstein et la pensée de la matière

Michel Paty

► **To cite this version:**

Michel Paty. Einstein et la pensée de la matière. Monnoyeur, Françoise. La matière des physiciens et des chimistes,, Hachette, p. 213-252., 2000, Le Livre de poche, Hachette. halshs-00167298

HAL Id: halshs-00167298

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00167298>

Submitted on 17 Aug 2007

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

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

in Monnoyeur, Françoise (éd.), *La matière des physiciens et des chimistes*, Le Livre de poche, Hachette, Paris, 2000, p. 213-252.

Einstein et la pensée de la matière

Michel PATY

Résumé.

On tente de caractériser la *pensée de la matière* chez et selon Einstein, telle qu'elle se révèle dans ses recherches, et telle qu'il l'a lui-même explicitée dans ses réflexions plus générales. Les premières font voir une pensée physique préoccupée de décrire et d'expliquer au plus juste l'objet étudié dans un enserrement théorique, selon un rapport révélateur de son style scientifique propre. Ce dernier se caractérise par sa dimension critique préparant une construction théorique sur la base de concepts et de principes physiques identifiés, et par une séparation corrélatrice des approches pour des objets de nature différente (comme le champ continu et les phénomènes atomiques et quantiques). Cette pensée d'une adéquation stricte et "complète", dans un sens bien défini, de la théorie à son objet, laisse entière la dimension d'unicité et d'extériorité de cet objet considéré en général, la matière dans la richesse de ses significations, que contribuent à révéler les autres approches scientifiques et la réflexion philosophique.

INTRODUCTION

"Einstein et la pensée de la matière" est un titre qui peut paraître de prime abord soit banal, soit étrange. *Banal*, parce que l'on s'attend bien à ce que, en tant que physicien, Einstein ait une pensée de la matière qui s'exprime dans son travail en physique, c'est-à-dire dans l'essentiel de son œuvre scientifique. Sa pensée de la matière, c'est, en un sens, son œuvre de physicien. Pourtant, ce n'est pas tout dire, outre que l'on ne s'attend pas ici à un compte-rendu de cette œuvre, même résumée selon ses grands axes. C'est que l'on fait une distinction entre l'exposé des travaux achevés et la pensée qui les guide ou qui transparait à travers

eux.

On pressent que “la pensée”, s'agissant d'un chercheur scientifique et de l'objet de sa recherche, est autre -et plus- que l'ensemble des résultats qu'il a obtenus. Elle est le mouvement qui y conduit, qui les fait signifier, qui les dépasse par cette signification même. Dans le cas d'Einstein, cela se marque à un degré exceptionnel si l'on considère, par-delà la portée de son œuvre, que, même dans ses exposés de présentation des connaissances en physique, il ne s'arrête jamais aux résultats acquis, y compris les siens, indiquant de *nouvelles directions pour la pensée*, suscitées par une insatisfaction sur ces résultats, même les plus remarquables.

Rien de banal donc, en fait, dans l'expression “pensée de la matière”, qui déborde l'œuvre vers la vie, qui la produit. Quant au son *étrange*, il tient aux ambiguïtés du mot *matière*, surtout parlant de la *pensée* quand elle s'applique à elle. Une expression comme “la pensée de la matière” aurait-elle un arrière-goût alchimique ou mystique, appelant à quelle expérience qui dépasserait la matière vers un au-delà d'elle ? A moins, plus simplement, qu'elle n'excède naturellement la matière comme objet de la physique pour atteindre d'autres aspects qui échappent à la physique au sens strict, la matière complexe de la chimie organique, celle, vivante, de la biologie..., suscitant le raccord des différentes disciplines qui traitent des propriétés de la matière, voire désignant peut-être une unité des sciences correspondant à celle de la matière envisagée selon toutes ses dimensions.

On peut d'ailleurs se demander si la pensée physique de la matière en tant que telle, dans sa spécificité, n'aurait pas quelque connexion à ces autres aspects dont on la distingue en général. Les travaux d'Einstein, par exemple, sous les objets des constructions théoriques, voire par ces constructions mêmes comme processus de pensée, ne donnent-ils pas quelque chose à saisir de cette totalité postulée que serait, philosophiquement, la matière comme étoffe ou réalité de l'univers ? Si c'était à quelque degré le cas, il faudrait voir comment cela serait conciliable avec le souci du physicien de faire droit à la nature de son objet d'étude et à la rigueur de méthodes qui lui soient appropriées, c'est-à-dire de rester strictement scientifique et de s'en tenir à la physique. Car la certitude gagnée par la connaissance scientifique est à ce prix.

De telles questions sont légitimes, mais elles sont difficiles à démêler si on les aborde directement. Il nous suffira ici de prendre comme fil directeur pour ainsi dire intuitif l'idée générale de l'expression-titre, dans un essai de comprendre la *pensée de la matière* chez et selon Einstein, telle qu'elle se révèle à nous, d'abord par ses travaux, puis dans une réflexion plus générale qu'il a lui-même explicitée. Nous verrons comment la pensée précise attachée à son objet ouvre, dans son projet de décrire et d'expliquer au plus juste, sur une richesse de significations qui tient pour une part à l'acte même de penser et, pour une autre, à

l'inexorable extériorité de l'objet de cette pensée, la matière du monde¹.

L'OBJET DE LA PHYSIQUE : DEUX APPROCHES DE LA MATIÈRE ET UNE QUESTION DE STYLE THÉORIQUE

Les travaux d'Einstein en physique semblent respecter une séparation stricte entre les recherches qui portent, d'une part, sur la physique du continu spatio-temporel (théorie de la relativité restreinte et de la relativité générale, tentatives de théories unifiées de la gravitation et de l'électromagnétisme, cosmologie) et, d'autre part, sur les propriétés atomiques et quantiques des corps. Chacun de ces deux grands thèmes renvoie à un genre d'objet caractéristique, appréhendé par un type de représentation théorique très différent de l'autre. Préoccupé par les deux dès ses premières recherches et tout au long de sa vie, Einstein les a toujours traités de manière distincte, tellement distincte que l'on s'est étonné parfois que ces recherches théoriques soient l'œuvre de la même personne. En vérité, on trouve, dans ces deux champs d'appréhension des phénomènes physiques, la même "griffe du lion" (pour reprendre l'expression de Jacques Bernoulli à la réception d'une pièce anonyme de Newton), la même précision et le même angle de perspective, fondamentale et conceptuelle, dans l'approche du problème posé. Si la méthode de traitement diffère, c'est clairement en raison de la nature de l'objet.

Il est remarquable qu'Einstein, porté comme on le sait à une vue unitaire, ait abordé ces deux domaines sans les soumettre à une unification forcée. On peut y voir la marque de son *style scientifique* propre, sensible à une exigence particulière d'adéquation "complète" -en un sens dont nous reparlerons- entre *la théorie et son objet*. Le second -l'objet-, c'est-à-dire la matière vue soit comme des corpuscules discrets -singuliers, voire singularités-, soit comme des entités -des champs- définis sur un continu spatio-temporel, appelant la première -la théorie- suivant sa nature et ses nécessités ; et la théorie, en retour, désignant l'objet suivant ses principes physiques généraux et ses grandeurs-concepts appropriées.

Cette caractérisation de *style* paraît plus conforme à ce que nous pouvons connaître de la méthode de travail d'Einstein, de sa *pensée* scientifique, que des qualifications schématiques renvoyant à deux périodes ou attitudes dans ses recherches en physique, la construction -empirique- dans sa jeunesse et la critique -au nom d'un rationalisme et d'un réalisme quasi métaphysiques- à partir

¹ Voir Paty [1988].

de l'âge mûr². On peut suivre, en vérité, tout au long de ses recherches, de ses premiers travaux à ses dernières réflexions, la permanence de cette double préoccupation pour le champ continu et les quanta, et la dualité persistante, dans ces deux directions, de son approche, toujours faite d'un examen critique en vue d'une construction théorique.

C'est ainsi que les trois premiers travaux d'Einstein les plus importants, publiés en 1905, qui attirèrent sur lui l'attention du milieu scientifique, portaient sur trois sujets différents, bien délimités et traités par lui selon des approches théoriques distinctes. L'un concerne la théorie atomique de la matière, un autre l'énergie du rayonnement lumineux, le dernier la relativité des mouvements en électrodynamique. Nous y reviendrons. Les deux premiers appartiennent à l'étude de la constitution de la matière, à laquelle Einstein ne cesserait par la suite de s'intéresser, par des contributions d'une rare fécondité, en développant et en discutant ce qui deviendrait la *théorie quantique*. Le troisième, connu comme la théorie de la relativité restreinte, ouvrait l'une des voies royales de ses recherches, vers la *théorie de la relativité généralisée* aux mouvements quelconques et aux champs de gravitation, avec ses prolongements en cosmologie et sur le champ unifié. Einstein continuerait, par la suite, ses recherches dans ces deux directions de manière indépendante, et le plus souvent en alternance.

De 1905 à 1911, l'attention pour les quanta l'emporta, avec une exception pour un article -fondamental- de 1907, où il faisait une première synthèse des idées sur la relativité -alors dans le sens restreint-, et qui constitue ses prolégomènes à la théorie de la relativité générale. Ayant obtenu des résultats significatifs sur les quanta -une première forme de dualité ondulatoire-corpusculaire pour la lumière, l'extension de l'hypothèse quantique à la structure atomique à travers le problème des chaleurs spécifiques-, il se consacra presque exclusivement, de 1912 à 1915, à la relativité générale. C'est juste après avoir mené celle-ci à sa conclusion, à la fin de l'année 1915, qu'il reprit les problèmes du rayonnement et de la structure atomique et formula, en 1916-1917, sa théorie semi-classique des quanta, première synthèse préparatoire des développements à venir qui menèrent, en 1925-1926, à la mécanique ondulatoire de Erwin Schrödinger et à la mécanique quantique de Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Paul Dirac et d'autres.

Dans la période intermédiaire, de 1923 à 1925, Einstein donna des contributions significatives sur les aspects quantiques de la matière tout en développant, indépendamment, ses idées sur la théorie du champ. Par la suite, cette dernière sembla occuper l'essentiel de son attention, avec la cosmologie et la théorie unitaire, sur lesquelles portèrent dès lors quasiment tous ses articles scientifiques. Il mena ses recherches en marge du courant dominant des

² Cette conception réductrice et normalisatrice est fréquemment rencontrée chez les physiciens qui ont "pris le parti de Bohr" contre Einstein à propos du débat sur l'interprétation de la mécanique quantique, et chez un certain nombre d'historiens et de philosophes des sciences.

physiciens, désormais tournés vers les développements foisonnants de la physique quantique, atomique puis nucléaire. Il se tint, à partir de 1927, de plus en plus à l'écart de cette direction, plongé dans des travaux qui paraissaient alors plus mathématiques que physiques, abandonnant le rôle de chef de file dans l'investigation des problèmes les plus actuels de la physique, qu'il avait tenu pendant vingt ans. On le critiquait vivement pour ce choix d'une voie considérée comme purement spéculative -sa fécondité ultérieure n'apparaîtrait que plus tard, avec la cosmologie évolutionnaire et les théories physiques de symétrie- et pour l'insatisfaction qu'il manifestait à l'égard des nouvelles conceptions de la physique.

Cela ne signifie pas pour autant qu'il se soit dès lors désintéressé de la physique des quanta. Bien au contraire, elle constituait sa préoccupation permanente, comme il l'avouait à quelques intimes et comme en témoignent de multiples remarques à ses correspondants sur les développements de la mécanique quantique, ainsi que quelques articles, échelonnés régulièrement au long des années, dans lesquels il s'interrogeait sur le caractère fondamental de cette théorie. Ces contributions critiques ont eu, en fait, une grande importance dans l'élucidation d'un certain nombre d'aspects à première vue paradoxaux de la mécanique quantique.

Le traitement séparé des deux grands types de problèmes physiques tels qu'Einstein les formulait, ceux du champ continu et ceux des quanta, apparaît ainsi comme une constante de son approche théorique. Pour l'essentiel, à part de rares exceptions dont nous reparlerons -notamment sur la lumière, en 1909-, les contributions scientifiques portant sur l'un ne traitent pas de l'autre. S'il arrive quelquefois qu'il soit fait mention de la question des quanta dans des travaux sur le champ unifié -à partir des années 20-, c'est de manière très brève, généralement dans les lignes de conclusion. Einstein en parlait plus volontiers dans ses lettres à des correspondants au sujet de ces recherches ; mais le contenu de ces dernières n'était aucunement affecté par cette préoccupation et portait seulement sur le champ, sans référence aux quanta.

Ses remarques, en quelque sorte incidentes, indiquent seulement que les problèmes des quanta se tenaient toujours à l'arrière-plan de ses préoccupations. Il n'espérait pas de leur formulation actuelle -par la mécanique quantique et la théorie quantique des champs qui la prolongeait- une avancée significative, mais faisait au contraire le pari que la lumière sur les quanta viendrait comme un surcroît de compréhension -et de détermination- des développements de la théorie du champ continu unifié. En fait, les problèmes de la structure de la matière atomique le préoccupaient autant, sinon plus, que ceux du champ continu, puisqu'ils portent sur les phénomènes qui nous sont les plus proches -comme il l'affirma lui-même. La stricte délimitation des deux domaines, ou des deux perspectives, dans sa recherche n'en reste que plus frappante : elle relève d'une question de fond, sur la nature de sa méthode de travail et sa pensée

théorique, et non des circonstances.

Par contre, comme il est naturel, Einstein abordait ensemble les deux thèmes, le champ continu et les quanta, dans ses textes généraux sur la physique, son évolution et ses problèmes actuels, tels que “Physique et réalité” (1936), “Notes autobiographiques” (écrit en 1946, paru en 1949), “Réponses aux critiques” (1949), et d'autres. Cette différence entre les travaux de recherche et les textes de synthèse -traitement séparé des deux thèmes dans les premiers, leur considération conjointe dans les seconds- confirme que la séparation tient à sa méthode théorique en rapport au type de problème -à l'objet- étudié, d'une manière que nous tenterons de caractériser. Pour ce faire, nous reviendrons tout d'abord sur les trois articles de 1905, qui font voir de la manière la plus manifeste la séparation thématique des problèmes, selon l'“effet de style” indiqué. Nous nous arrêterons aussi, à ce propos et dans la suite, à la question de leurs points de rencontre éventuels, qui témoigne de l'unicité -en profondeur- de l'objet à l'étude, par-delà les possibilités de traitement théorique. Nous reviendrons enfin sur la question plus générale de la matière comme objet de science.

TROIS TRAVAUX SEPARES SUR DES OBJETS DISTINCTS

Dès les trois publications principales de son “année d'or” -l'année 1905-, sur les phénomènes atomiques et le rayonnement, d'une part, sur le champ électromagnétique et le principe de relativité, d'autre part, on voit Einstein traiter séparément les problèmes correspondants, chacun d'une manière très particulière, fonction de l'objet étudié. Ces trois problèmes étaient considérés généralement comme les plus importants de la physique de l'époque, mais la tendance était plutôt de les envisager ensemble, sous l'égide d'une théorie physique renvoyant à une force fondamentale unique, celle de l'électrodynamique. La “vision électromagnétique du monde” était alors une perspective très en faveur chez de nombreux physiciens et physico-mathématiciens, parmi lesquels Hendrik A. Lorentz, Wilhelm Wien, Max Abraham, Paul Langevin, Alexandre Minkowski, voire, avec des nuances, Henri Poincaré. Un exposé de Langevin à peu près contemporain des travaux d'Einstein évoqués, proposait, sous le titre “La physique de l'électron”, un essai de synthèse qui prenait tous ces problèmes en considération -en y incluant les phénomènes de la radioactivité, de découverte récente-, y voyant les manifestations d'une même réalité physique sous-jacente, dont la nature était fondamentalement électromagnétique³.

Dans ses propres recherches de cette époque sur ces problèmes,

³ Conférence de Langevin au Congrès international des arts et des sciences, Saint Louis du Missouri, en 1904 : voir Langevin [1904].

Einstein ne préjugait pas d'une synthèse future : il s'en tenait à l'examen des théories existantes correspondant à chaque genre de phénomène étudié, s'interrogeant sur leur validité et sur leurs limitations, rapportées à la signification physique des concepts en jeu dans ces conditions théoriques. Il ne partageait pas la "conception électromagnétique du monde", la théorie électromagnétique n'étant, à ses yeux, que l'une des théories physiques disponibles, avec la thermodynamique et la mécanique classique. Ces théories entraînent, pour certaines catégories de phénomènes, en contradiction ; aucune n'était absolue, mais chacune d'elle contenait "une part fondamentale de vérité" -une expression qu'il emploierait souvent par la suite-, appelée à demeurer à travers toute réforme. Pour les phénomènes physiques de nature distincte étudiés dans ses trois articles, Einstein proposait une solution théorique appropriée à chacun, traité indépendamment des autres. Ou, du moins, presque indépendamment : car l'on constate, entre ces trois approches théoriques -celle de la constitution moléculaire, de la quantification de l'énergie du rayonnement lumineux et de la relativité restreinte-, des points de contact, qui tiennent au *mouvement du travail de la pensée* s'appliquant à ces problèmes.

En amont des deux publications de 1905 sur les dimensions moléculaires et sur les quanta de rayonnement, se trouve une réflexion critique sur le "principe de Boltzmann" de la thermodynamique -l'appellation est d'Einstein-, exprimé par l'équation donnant l'entropie (S) en fonction de la probabilité d'état (W) d'un système physique ($S = k \log W$). Einstein avait proposé, en 1903, de réinterpréter la fonction de probabilité, en lui donnant la signification physique d'une fréquence d'états pour un système au cours de son évolution dans le temps⁴. Il en avait déduit l'existence de fluctuations autour de la valeur moyenne de cette *probabilité physique*, en indiquant que cette considération pourrait être appliquée aux *mouvements moléculaires* aussi bien qu'aux problèmes du *rayonnement thermique* : ces fluctuations devaient correspondre à des effets physiques observables. L'utilisation des probabilités et le calcul de fluctuations de grandeurs physiques autour d'une valeur moyenne allaient devenir, dans les mains d'Einstein, un outil heuristique systématique pour l'exploration des phénomènes liés à la constitution de la matière. Elle est à l'origine de pratiquement toutes ses contributions à l'élaboration de la physique quantique.

C'est cette idée qu'il mettait en œuvre dans son second article de 1905, connu comme donnant l'explication du "mouvement brownien", mais qui fournissait en outre des relations précises sur les dimensions des molécules ou des atomes et leurs libre-parcours (ces relations devaient être vérifiées expérimentalement quelque temps après par Jean Perrin)⁵. Dans un premier

⁴ Einstein [1903]. k est la constante de Boltzmann. Antérieurement au travail d'Einstein, par exemple chez Planck, W avait la signification mathématique d'une probabilité dans le sens de l'analyse combinatoire.

⁵ Einstein [1905b], Perrin [1909, 1913]. Cf. Paty [1988], chap. 3.

article, sur le rayonnement thermique, Einstein proposait un rapprochement entre le comportement d'un rayonnement enclos dans une enceinte et celui d'un volume fermé de gaz, en raison de la même forme de l'équation thermodynamique à l'équilibre -celle de Boltzmann-, ce qui entraînait la quantification de l'énergie du rayonnement ($E = h\nu$)⁶.

Le troisième article, de nature différente -il n'y est pas question de structure de la matière, ni de probabilité-, portait sur la formulation théorique de l'électrodynamique des corps en mouvement, dont il donnait le résultat définitif, ultérieurement connu comme la *théorie de la relativité restreinte*, bien qu'il n'ait rien publié auparavant sur ce problème. Ce travail avait toutefois été préparé par des recherches et réflexions antérieures sur la théorie électromagnétique, considérée sous l'angle de son rapport au mouvement, qui l'avaient amené à se persuader de la nécessité de reformuler la théorie. La raison essentielle invoquée était que la *théorie* électromagnétique, dans sa formulation d'alors -celle de Maxwell-Lorentz-, se trouvait en contradiction avec le principe de relativité des mouvements d'inertie -rectilignes et uniformes- de la mécanique, par sa référence à un éther en repos absolu, siège des ondes électromagnétiques. Or les *phénomènes* électromagnétiques -en particulier l'induction, influence mutuelle d'un courant électrique et d'un champ magnétique en mouvement l'un par rapport à l'autre- et les expériences d'optique plaidaient au contraire en faveur de ce principe.

Soucieux de préserver ce qui lui paraissait essentiel dans la théorie électromagnétique -la constance de la vitesse de la lumière dans le vide, qui était au fondement même de la théorie de Maxwell-, Einstein formula le problème comme celui d'une conciliation entre cette propriété, élevée au rang d'un principe physique, et le principe de relativité pour les mouvement d'inertie, venu de la mécanique mais qui semblait être de validité plus universelle. Cette conciliation était possible à condition de redéfinir les coordonnées d'espace et le temps pour les corps matériels en les soumettant au respect des deux principes adoptés⁷.

La théorie de la relativité restreinte, résultant de cette reconstruction, proposait la *réforme* de la théorie électromagnétique non pas comme une autre *dynamique* -une *nouvelle théorie* du champ électromagnétique-, mais comme la conséquence, sur la forme des équations admises de la dynamique, d'une modification plus générale de la *cinématique*, c'est-à-dire de la théorie fondamentale des vitesses et des accélérations, par une refonte des conceptions physiques de l'espace et du temps. Il reste que *l'insatisfaction à l'égard de la théorie électromagnétique d'alors* fut le point de départ du raisonnement d'Einstein.

En réformant l'une par l'autre la mécanique classique et la théorie

⁶ Einstein [1905a].

⁷ Einstein [1905c]. Voir, pour plus de détails, Paty [1993a, 1996b].

électromagnétique, par la confrontation de leurs principes fondamentaux respectifs, Einstein ne les prenait ni l'une ni l'autre pour absolues ou définitives, et leur critique fut le moment initial de sa reconstruction. Or, il était au même moment conscient d'autres difficultés de la théorie électromagnétique, comme celles relatives au spectre du rayonnement lumineux, apparues à travers les travaux de Planck, mais dont il fut le premier à percevoir le caractère irrémédiable -et donc la nécessité de disposer d'une autre théorie. Cela devait être rendu évident par la discontinuité de l'énergie des quanta de rayonnement, dont la théorie du champ électromagnétique continu ne pouvait rendre compte -les travaux de Planck de 1900 ne faisaient état que d'une quantification des échanges d'énergie, sans affecter le rayonnement lui-même. La première approche qu'Einstein fit des quanta l'amena donc à soupçonner d'emblée les limites de la théorie électrodynamique dans le domaine moléculaire -il les précisa dès l'année suivante, par sa méthode des fluctuations appliquée au rayonnement⁸. Elle lui confirma sans doute aussi l'inutilité de l'éther.

Dans l'article sur l'électrodynamique et le principe de relativité, Einstein constatait l'identité, pour un rayonnement lumineux, entre la formule de transformation relativiste de l'énergie et celle de la fréquence, et en faisait ce simple commentaire : "Il est remarquable que l'énergie et la fréquence d'un complexe lumineux varient avec l'état du mouvement de l'observateur en suivant la même loi"⁹. En notant l'invariance du rapport $\frac{E}{\nu}$, il aurait pu faire état de la coïncidence entre cette propriété et la relation $E = h\nu$, qu'il avait obtenue indépendamment dans son article précédent sur les quanta. Qu'il ne l'ait pas fait dans ce travail sur la théorie de la relativité, totalement indépendant de celui sur les quanta de lumière, est assurément significatif comme trait de son "style" ; en outre, les deux contributions théoriques n'avaient pas, à ses yeux, le même statut. L'une était une réforme fondamentale, basée sur des principes théoriques clairement identifiés, l'autre un simple "point de vue heuristique".

Ainsi les premières recherches d'Einstein s'appellent-elles, dans le même mouvement -voire dans l'unité profonde- d'une pensée physique, soucieuse cependant de faire totalement droit à la spécificité des phénomènes et objets étudiés en rapport à la possibilité de leurs représentations théoriques. C'est ainsi que les trois problèmes-clés de la physique, en 1905, sont examinés et traités dans trois articles séparés et de trois manières distinctes. L'examen de ces textes, prolongé par celui des travaux qui leur font suite sur les mêmes problèmes, fait apparaître les caractères de *style* mentionnés, appropriés aux contenus physiques des problèmes abordés¹⁰.

⁸ Einstein [1906]. Voir Jammer [1966], Kuhn [1978], Paty [1985].

⁹ Einstein [1905d], seconde partie, "Electrodynamique", paragraphe 8.

¹⁰ Paty [1993a, et à paraître].

ANGLES D'APPROCHE
ET RECOUVREMENTS THÉORIQUES

La lumière entre la relativité restreinte et les quanta

Rares sont les travaux scientifiques d'Einstein où l'on trouve ensemble des considérations relatives aux deux domaines, la physique des quanta et la théorie de la relativité. L'un des plus significatifs est celui présenté dans une conférence donnée en 1909 à Salzbourg, à un symposium de physique, sous le titre "L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement"¹¹. Il y traitait cette fois du rapport que les quanta de lumière entretiennent avec la théorie de la relativité restreinte, dans la mesure où cette dernière met en évidence une propriété du rayonnement électromagnétique.

Einstein avait montré en 1905 -dans un article qui complétait celui sur la relativité en établissant l'inertie de l'énergie, avec la formule $E = mc^2$ - que "le rayonnement transporte de l'inertie entre les corps émetteurs et les corps absorbants"¹². Il reprenait ce résultat, dont il donnait une nouvelle démonstration, basée sur la cinématique : "La masse inerte d'un corps diminue de $\frac{L}{c^2}$ lorsque celui-ci émet l'énergie rayonnante L ". Il rappelait aussi l'invariance du rapport entre l'énergie et la fréquence, $\frac{E}{\nu}$ -noté sans autre commentaire en 1905, comme on l'a vu-, en le rapprochant explicitement cette fois de la relation quantique $E = h\nu$. Il y voyait une indication de cohérence quant à la nature et aux propriétés des rayons lumineux, dont l'énergie, par sa discontinuité même, avait tous les caractères d'une grandeur physique autonome¹³.

"La théorie de la Relativité", indiquait-il dans la conférence de Salzbourg, "a donc changé nos conceptions sur la nature de la lumière" en ceci que "la lumière n'est plus conçue comme des états d'un milieu hypothétique (l'éther) mais existe de façon autonome, comme la matière ; de plus, elle transfère de la masse inerte entre le corps émetteur et le corps absorbant." Mais cette information laissait entier le problème de la nature proprement dite de la lumière : la Relativité n'y a "rien changé". Autrement dit, elle n'avait fait qu'explicitier les relations qui viennent de la cinématique, mais restait muette sur la dynamique. Elle n'a rien changé, "en particulier, à notre conception de la répartition de l'énergie dans l'espace traversé par le rayonnement", observait Einstein, dans la transition entre la partie de son exposé sur la théorie de la relativité et celle sur les

¹¹ Einstein [1909].

¹² Einstein [1905e]. Voir aussi Einstein [1907b].

¹³ Il en avait également fait mention, peu de temps auparavant, dans une lettre à H.A. Lorentz du 23.5.1909 (archives Einstein ; trad. fr. *in* Einstein [1989a], p. 105-109).

quanta, et “notre théorie classique (électromagnétique) de la lumière est incapable d'expliquer certaines propriétés fondamentales des rayons lumineux”¹⁴.

Il soulignait par là l'insuffisance de la théorie électromagnétique en ce qui concerne les phénomènes du rayonnement, qu'il avait reconnue comme irrémédiable dès 1906 en montrant -par un raisonnement fondé sur un calcul de fluctuation- que l'introduction des quanta de Planck était inconsistante dans le cadre de la théorie classique¹⁵. Il prophétisait, en se fondant sur le résultat obtenu à propos du rayonnement, présenté en seconde partie de son exposé, “que la prochaine étape du développement de la physique théorique” correspondrait à l'obtention d'une théorie de la lumière que l'on interpréterait “comme une sorte de fusion de la théorie ondulatoire et de la théorie de l'émission [c'est-à-dire corpusculaire]”. La dualité ondulatoire et corpusculaire de la lumière ne serait totalement acquise que lorsque serait mise en évidence, outre l'énergie quantifiée, caractéristique d'une sorte d'“entité indépendante”, son impulsion liée à la fréquence : il l'obtint lui-même en 1916, en mettant au point la première théorie des quanta, encore semi-classique, qui serait le point de départ des idées menant aux mécaniques ondulatoire et quantique¹⁶.

Einstein l'admettait comme un caractère des phénomènes quantiques, mais il en attendait une formulation plus rationnelle d'une théorie quantique future. Il soulignerait de manière très explicite, dans ses commentaires critiques sur la mécanique quantique, que celle-ci s'en tenait à des concepts classiques, voire mécaniques, tels que l'onde et le corpuscule, alors qu'une théorie satisfaisante devrait les dépasser. Tel était également le cas, pour lui, des “relations d'indétermination” de Heisenberg entre des grandeurs conjuguées (du type $\Delta x \cdot \Delta p > \hbar$ ¹⁷), quand il se fût persuadé qu'elles étaient totalement établies¹⁸. Ces propriétés qu'il fallait admettre, car les phénomènes quantiques les imposaient à travers leur cohérence, trouvaient une formulation contradictoire dans le cadre de théories fondées sur des concepts classiques : la conception “orthodoxe”, en fondant la complémentarité sur la dualité, au nom de la nécessité de se rapporter à des concepts classiques, appropriés aux instruments d'observation et de mesure -la référence étant la “réalité telle qu'on l'observe”-, ne sortait pas de cette limitation.

D'une certaine manière, la formulation présente de la mécanique quantique illustre, pour Einstein, l'inconvénient qu'il y a à vouloir mêler, dans l'élaboration d'une théorie fondamentale, des approches partielles et contradictoires. Celles-ci ne pouvaient être que des palliatifs provisoires, justifiés

¹⁴ Einstein [1909].

¹⁵ Einstein [1906].

¹⁶ Einstein [1916a et b].

¹⁷ x représente les coordonnées d'espace, p l'impulsion, \hbar la constante de Planck réduite.

¹⁸ Cf. Paty [1985].

seulement par leur force heuristique : elle étaient révélatrices des modifications conceptuelles qu'il faudrait opérer pour fonder une théorie qui soit totalement appropriée aux phénomènes, c'est-à-dire à son objet spécifique -une "théorie proprement quantique", comme il l'avait lui-même qualifiée.

Si nous revenons aux deux genres de théories qui l'occupaient, appropriées à leurs objets, conçues par des approches indépendantes (la relativité restreinte et les quanta), la lumière était un des lieux de leur recouvrement possible. Son rôle est manifeste en théorie de la relativité, par sa vitesse -d'abord, avec la relativité restreinte par la considération du champ électromagnétique, ensuite plus largement en tant que constante de structure de l'espace-temps aussi bien pour la relativité restreinte que pour la relativité générale), ainsi qu'en théorie des quanta, en ce qu'elle est rayonnement, d'énergie quantifiée, produit par des échanges d'énergie dans la structure atomique. En ce sens les relations entre l'énergie et la fréquence et entre l'impulsion et longueur d'onde indiquaient un terrain commun entre la relativité restreinte et les quanta : cette direction serait exploitée par Louis de Broglie, qui utilisa la relativité restreinte pour étendre ces relations, c'est-à-dire la dualité onde-corpuscule, aux éléments de matière¹⁹.

Mais cela ne suffirait pas, aux yeux d'Einstein, qui signala au monde scientifique l'importance de ce résultat, pour concilier la théorie des quanta et la relativité ou prétendre renforcer la première en lui ajoutant la seconde, puisque ces concepts de base restaient les mêmes : il ne fut convaincu ni par la théorie de Dirac (théorie quantique de l'électron relativiste), ni par la théorie quantique du champ (ou électrodynamique quantique), obligée à des procédures artificielles pour éliminer des quantités infinies...

Les quanta dans l'espace-temps

Un autre lieu ou motif possible de recouvrement des représentations théoriques séparées qu'étaient, pour Einstein, celle du champ continu et celle des phénomènes quantiques, tenait à ce qu'elles devaient être, à ses yeux, données dans l'espace et dans le temps : cette représentation, explicite pour le champ continu, constituait plutôt une demande seulement dans le cas de la physique quantique. Le recouvrement de l'objet de l'une des théories par des éléments de l'autre se marque, en effet, d'une manière différente, dans les interprétations qu'Einstein donna de certains caractères quantiques en les traduisant en termes de propriétés spatiales, fût-ce pour les interpréter ensuite autrement si ces propriétés étaient impensables, bien que la théorie quantique ne les proposât pas dans ces termes. C'est le cas de l'indiscernabilité des particules identiques, et de la "non-localité" ou "non-séparabilité locale".

Einstein lui-même établit en 1924-1925 la propriété d'*indiscernabilité*

¹⁹ De Broglie [1924].

des particules identiques -celles que l'on a appelées ensuite *bosons*, soumises à la statistique dite "de Bose-Einstein" avec une fonction d'état symétrique, les autres, ou *fermions*, étant caractérisées par une statistique, établie par Fermi et Dirac, de fonctions d'état antisymétriques. Dans le premier cas, l'échange de deux particules indiscernables au sein d'un même système physique ne changeait rien à l'état du système, dans le second, cet échange n'était pas possible -c'est le principe d'exclusion de Pauli. Dans les deux cas, la propriété n'avait pas d'analogue avec les particules au sens habituel, qui peuvent être identiques mais sont toujours identifiables. Einstein acceptait cette propriété, qu'il considérait comme connue empiriquement, au même titre que la dualité ondulatoire et corpusculaire des particules quantiques, et la concevait comme une dépendance inexpliquée entre des particules localisées différemment dans l'espace -dans des dimensions atomiques²⁰.

Il concevait bien qu'elle correspondait aux phénomènes, puisqu'il en inféra ses prédictions mémorables de la condensation d'un gaz de bosons (condensation dite de Bose-Einstein), de la supra-conductivité et de la superfluidité, qu'il comprenait comme des phénomènes pleinement physiques, et qui ne seraient confirmées que bien plus tard²¹.

Quand à la non-localité, il en releva une manifestation, dès 1927, à propos du phénomène de diffraction des électrons et de l'interprétation statistique de la fonction d'onde, formulée en 1926 par Max Born, d'ailleurs inspiré par une suggestion d'Einstein lui-même²². Les impacts corpusculaires d'un faisceau d'électron sur l'écran, qui reproduisent la distribution de probabilité, indiquent une sorte de dépendance entre les divers lieux possibles d'un même impact, si la probabilité est relative à un électron individuel²³. Analysant plus avant ce genre de propriété paradoxale qui tenait à la forme de la fonction d'état et à sa signification en termes d'amplitude de probabilité, Einstein fut conduit à soulever, à partir de 1935, avec son "argument EPR", une forme plus systématique et plus troublante de cette non-localité apparente. Deux sous-systèmes physiques d'un même système initial (commune appartenance qui maintenait entre eux une contrainte), éloignés de manière arbitraire, entretiendraient une connexion instantanée, contraire aux principes de la relativité restreinte.

En effet, explicita-t-il dans plusieurs textes, le mesure de l'un des sous-systèmes fournit -par la contrainte initiale commune- la connaissance de la fonction d'état de l'autre, sans que ce dernier soit modifié par la mesure. Si l'on veut maintenir une correspondance biunivoque entre le sous-système et sa

²⁰ Einstein [1924, 1925a et b].

²¹ *Ibid.*

²² Born [1926]. Sur la filiation de la notion de "champ fantôme" d'Einstein à l'onde de probabilité de Born, cf. Pais [1982], p. 442-443 et Stachel [1986].

²³ Einstein [1928]. Cf. Paty [1985].

fonction d'état, il faut admettre une telle interaction instantanée entre le système mesuré et lui malgré un éloignement arbitraire. Cette éventualité lui paraissant – à bon droit – inacceptable, le seul recours restait, à ses yeux, de considérer que la fonction d'état ne représente pas un système quantique individuel, mais seulement un ensemble statistique de tels systèmes. Il y voyait la preuve du caractère incomplet de la mécanique quantique. Il serait acquis plus tard, après les travaux de John Bell – inspiré notamment par les remarques d'Einstein – et les expériences de corrélation quantique à distance, que cette *non-séparabilité locale*, qui paraissait inacceptable à Einstein, est encore une propriété phénoménale des systèmes physiques quantiques²⁴.

En fait tous les traits de non localité relevés ne seraient alors que des apparences, puisqu'ils ne concernent pas, à vrai dire, des systèmes ou particules quantiques individuels. Ce seraient des propriétés grossières d'ensembles statistiques. Les probabilités auraient pour rôle, dans cette perspective, de raccorder des propriétés spatio-temporelles de type seulement statistique à une causalité physique. Cependant, dans la mécanique quantique, la probabilité a une signification pour des événements individuels : un photon ou un électron interfère avec lui-même, et la fonction d'état qui le représente, comme amplitude de probabilité, en rend bien compte.

Einstein savait bien, quant à lui, que le caractère quantique des phénomènes concerne des systèmes physiques individuels. Il l'avait prévu pour ce qui concerne les propriétés corpusculaires de la lumière, par la mise en évidence de corrélations individuelles entre les “particules” sortantes, dans la diffusion d'un photon sur un électron. Ces corrélations avaient été vérifiées par les expériences de Bothe et Geiger réalisées en 1925, quant la théorie “BKS” de Bohr, Kramer et Slater, où la conservation de l'énergie et de l'impulsion serait seulement statistique, proposait au contraire une absence de corrélation signant le caractère seulement statistique de la réaction, et donc l'absence d'aspect directement corpusculaire, qui sauverait la théorie ondulatoire continue classique²⁵. Convaincu de la “réalité” irréductible des quanta, Einstein estimait que “la *mécanique* quantique” qui apparaissait nécessaire ne pouvait reposer sur une théorie classique de la lumière : une plus grande généralité lui paraissait requise, et la théorie électromagnétique devait être modifiée de manière fondamentale²⁶.

Il ne lui parut pas, cependant, que la mécanique quantique désormais proposée fût cette théorie radicalement nouvelle qu'il appelait de ses vœux, et en particulier qu'elle répondît à la nécessité de décrire des systèmes physiques

²⁴ Bell [1987]. Cf. Paty [1986b, 1988a, 1995].

²⁵ Bohr, Kramers, Slater [1924], Geiger et Bothe [1924, 1925], Einstein [1926]. Cf. Paty [à paraître].

²⁶ Einstein, lettre à Ehrenfest du 31.5.1924 (souligné par Einstein). Le terme “mécanique quantique” fut également employé par Max Born dans un article de la même année: “Ueber Quantenmechanik” (Born [1924]).

individuels. Mais il avait établi cette conviction sur la transcription en termes spatiaux de *propriétés* quantiques qu'il était par ailleurs le premier à admettre. C'est dans la mesure où il voulait se donner une représentation -une visualisation spatiale de ces propriétés -symétrie de particules indiscernables, non séparabilité locale- qu'il les interprétait comme des manifestations de dépendance mutuelle de nature dynamique. Car les formulations théoriques qui les font apparaître, prises strictement, n'impliquent pas, en fait, d'interaction au sens propre (entre des éléments qui ne sont pas autrement définis) : considérées *a minima*, elles ne font que décrire des traits caractéristiques du genre de système physique que sont les états quantiques²⁷.

En quelque sorte, si l'on me permet ce jugement, il avait transgressé sa propre règle méthodologique, en admettant trop vite que la description de systèmes physiques comme les quanta de matière devait être donnée dans l'espace, quand les éléments théoriques strictement requis par les phénomènes quantiques ne contenaient pas cette exigence -ce qu'il avait d'ailleurs lui-même relevé²⁸-, les particules quantiques se présentant comme des "systèmes naturellement étendus", sans que cela viole la relativité restreinte, si les définitions correspondantes ne la touchent pas -il n'y est pas question de points d'espace-temps individués entre lesquels se transmettraient des signaux.

La question de l'unité théorique

Il reste enfin la question de l'unité théorique, qui s'impose même en respectant la méthode einsteinienne du traitement séparé, et qui porte aussi ses effets de recouvrement éventuels, fussent-ils partiels, d'objets et de représentations. Cette unité, qu'Einstein n'avait pas eu à faire directement intervenir dans ses travaux jusqu'à la Relativité générale, se profilait désormais, à ses yeux, en l'état donné de la physique théorique, à partir des années 20. Répondant à une critique des physiciens quantiques, en l'occurrence Max Born et Wolfgang Pauli, il répliqua un jour ceci : "Je ne suis absolument pas un défenseur acharné du schéma dit classique, mais que je crois nécessaire de satisfaire d'une façon ou d'une autre à la Relativité générale, dont la puissance heuristique est indispensable, à mon avis, au progrès réel"²⁹. L'allusion à la Relativité générale constitue une indication sur son propre programme de recherches, qu'il concevait comme essentiellement prospectif et nullement comme un retour en arrière³⁰.

²⁷ Paty [1988a, 1986b, et à paraître].

²⁸ Einstein [1949].

²⁹ Einstein, lettre à Max Born, 1.6.1948, *in* Einstein, Born [1969].

³⁰ Mais même ceux qui, comme Pauli, prêtaient l'oreille à cet aspect de la position d'Einstein, niaient que cela fût vrai (cf. Pauli [1949], *in* Schilpp 1949, p. 158). Sur le programme d'Einstein, voir Paty [1995].

La physique, pour lui, avait atteint un stade où elle ne pouvait se contenter d'être une simple 'phénoménologie' ; elle devait, d'une manière ou d'une autre, intégrer les leçons de la Relativité générale. Les phénomènes quantiques relevaient en l'état actuel des choses d'une approche différente de celle en termes de champ défini sur le continuum spatio-temporel, et les considérations d'Einstein sur la mécanique quantique s'en tenaient à la spécificité de cette dernière -aux remarques près du passage précédent. Il faudrait bien, un jour, raccorder dans une unité plus haute la théorie de la matière élémentaire et celle de la gravitation : par-delà ses critiques immédiates, c'est à un tel programme qu'il songeait constamment. Il n'imposait pas, pour autant, à la mécanique quantique les exigences qu'il formulait pour une théorie du champ : il se demandait seulement si elle pouvait servir de base pour aller plus loin, si elle était "complète" en un sens faible -celui de l'argument EPR, c'est-à-dire donnant une représentation univoque d'un système physique individuel- pour servir de base à la construction d'une théorie "complète" en un sens fort -une théorie complète de la relativité générale serait une théorie du champ et de sa source, sans paramètre arbitraire³¹.

Pour le reste, Einstein se garda de mêler les traitements théoriques de ces deux ordres de phénomènes, tout en faisant, intérieurement pour ainsi dire, le pari que la solution du second -la nature et la représentation satisfaisante du domaine quantique- pourrait être obtenue indirectement d'une condition que le premier -le champ continu, convenablement traité- ferait apparaître nécessaire.

UNE VUE SYNTHÉTIQUE SUR LA REPRÉSENTATION DE LA MATIÈRE

Ce qui précède nous aura fait comprendre des éléments de l'attitude intellectuelle d'Einstein face au problème de l'édification d'une représentation théorique de la matière en ce qui concerne l'objet de la physique. Ce tableau d'une pensée de la matière en acte doit être complété par l'évocation de ses vues plus générales sur la matière, saisie sous les diverses facettes par laquelle l'abordent d'autres disciplines scientifiques, voire en rapport à la question de son unité. Nous privilégierons pour cela un écrit d'Einstein assez peu connu, qui se prête au sujet d'une manière particulièrement heureuse. Ce texte court fut présenté comme conférence devant des praticiens d'une discipline fort différente de la physique : les membres du Collège International des Chirurgiens. Son titre, "Physique,

³¹ Paty [1988b, 1993a].

philosophie et progrès scientifique”³², laisse entrevoir son caractère synthétique et sa perspective large, adaptée à son public, ouverte à d'autres sciences de la nature, en particulier la biologie, ainsi qu'aux problèmes philosophiques de la connaissance.

Einstein commença par évoquer le cadre général des conceptions des physiciens, dans son évolution depuis le dernier siècle, où prévalaient les idées de déterminisme et de causalité pour tous les phénomènes matériels, ramenés à des actions de masses ponctuelles immuables. “D'un point de vue philosophique”, expliquait-il, cette conception du monde “était celle d'un réalisme naïf”, où les objets dans l'espace étaient “considérés comme quelque chose d'immédiatement donné par notre expérience sensible”. Pourtant, le fait même de concevoir des masses ponctuelles “était déjà un pas vers un réalisme plus raffiné”, puisqu'il “n'est pas conditionné par l'expérience sensible” : il s'agissait, en réalité, pour qui voulait bien y réfléchir, d'un réalisme pour des concepts abstraits, mais cette conception n'était pas encore consciente d'elle-même -et elle admettait encore l'induction à partir des phénomènes. Le concept de champ -électromagnétique, à répartition continue dans l'espace- obligea à un plus grand raffinement de “cette conception réaliste”, parce qu'il se présentait comme irréductible à une mécanique des points matériels, et qu'il est difficile de penser les champs comme immédiatement donnés par l'expérience sensible.

La représentation physique admit alors -jusque voici 25 ans, c'est-à-dire jusqu'à l'apparition de la mécanique quantique- le champ continu comme correspondant à la réalité fondamentale -on pouvait se passer du concept de masse ponctuelle. En sorte que le cadre de la pensée physique pouvait être résumé de la manière suivante : il existe une réalité physique indépendante de toute perception, qui peut être appréhendée complètement “par une construction intellectuelle spatio-temporelle, laquelle n'a toutefois pas d'autre justification que d'être vérifiée empiriquement” ; les lois de la nature sont des lois mathématiques entre les grandeurs physiques qui sont les ingrédients de la construction, et elles sont totalement causales.

Mais aujourd'hui, indiquait alors Einstein, se faisant l'avocat des conceptions quantiques survenues depuis cette époque -point si lointaine, qui avait vu le succès de la théorie de la relativité générale-, “sous la pression d'un ensemble écrasant de faits expérimentaux concernant les phénomènes atomiques”, les physiciens “en sont *presque tous* arrivés à la conviction que ce cadre conceptuel”, dont le champ d'application était pourtant fort vaste, “ne pouvait plus être conservé”³³. Ils remettaient en cause non seulement “l'exigence d'une causalité intégrale, mais aussi le postulat d'une réalité indépendante de toute

³² Einstein [1950]. Conférence au Congrès International des Chirugiens, le 3 novembre 1950, à Cleveland (Ohio). Einstein prononça sa conférence en anglais sur une traduction de son manuscrit rédigé en allemand (qui se trouve aux Archives Einstein).

³³ *Ibid.* C'est moi (M.P.), qui souligne.

constatation et de toute expérience”. Soulignons, dans cette citation, le “presque tous”, qui laisse entendre, sans insister, le caractère problématique de l'interprétation dominante, aux yeux du moins de quelques uns -dont lui-même, comme nous le savons.

Qu'Einstein n'ait pas pris ici la peine de le spécifier et d'entrer dans les détails est intéressant à plusieurs égards. Ne s'adressant pas à des spécialistes de la physique, il ne leur imposait pas son propre jugement sur l'interprétation, mais du moins laissait-il entendre que la nature de la remise en cause demeurerait une question en débat. Pour le reste, la description proposée est aussi objective que possible, en termes des phénomènes physiques s'imposant à tous, des caractères essentiels de la physique des quanta et de son approche théorique, la mécanique ondulatoire ou quantique. A ses auditeurs de se rendre compte de ce qu'est la nécessité des phénomènes, et du genre de représentation qu'il est possible d'en donner du point de vue théorique. Il le leur donnait à voir par l'exemple classique de l'interférence de deux rayons de lumière, séparés par un diaphragme à deux fentes. L'interférence relève de la nature ondulatoire de la lumière. Mais, dans ses phénomènes d'absorption, celle-ci manifeste des propriétés de quantification de son énergie : elle “a une structure énergétique atomique”, structure que l'on traduit dans une qualification corpusculaire en termes de photons. (On sait ce que ces connaissances doivent à Einstein lui-même, mais il ne le précisa pas dans son allocution).

Allant droit à l'essentiel, il résuma alors la propriété fondamentale qui en ressortait : “Nous sommes forcés [de] conclure que les phénomènes constatés n'ont rien à voir avec l'effet de plusieurs photons, mais que c'est au contraire le photon unique qui explique aussi bien la capacité d'interférence des deux rayons que l'absorption en un endroit précis de l'un des deux rayons”. Comme l'indiquait Paul Dirac dès 1930 dans ses *Principes de la mécanique quantique*³⁴, et comme Max Born le rappelait dans un ouvrage de 1949 sur le hasard et la causalité, et dans son livre sur les *Principes de l'Optique*³⁵, ainsi que dans une lettre à Einstein³⁶, dans un phénomène d'interférence, le photon interfère avec lui-même - et il en va de même en ce qui concerne la particule quantique à laquelle ces propriétés du photon avaient été étendues par de Broglie, par Einstein lui-même, par Schrödinger, Max Born et d'autres³⁷.

Ces caractères, continuait d'expliquer Einstein, obligeaient à rechercher une théorie qui en rendît compte, la théorie électromagnétique de Maxwell ne pouvant expliquer les propriétés corpusculaires ou de quantification

³⁴ Dirac [1930].

³⁵ Born [1949], Born et Wolf [1959].

³⁶ Max Born, lettre à Einstein du 9.5.1948, in Einstein, Born [1969], lettre n°89.

³⁷ De Broglie [1924], Einstein [1924, 1925a et b], Schrödinger [1926], Born [1926], etc.. Einstein admettait donc aussi l'interférence d'une particule quantique avec elle-même. Elle lui faisait cependant problème au niveau de l'interprétation, comme on l'a vu.

du rayonnement, qu'elle conçoit comme continu. Cette nouvelle théorie était la mécanique quantique ou ondulatoire : le rayonnement électromagnétique -le photon- y garde sa forme de propagation d'un champ ondulatoire, mais suivant une interprétation différente de la nature de cette onde : "Ce champ ondulatoire n'est pas l'expression d'un *champ réel* avec une énergie répartie dans l'espace, mais une *construction mathématique* dont la signification physique est la suivante : l'intensité du champ ondulatoire en un endroit est l'expression de la probabilité pour que le photon soit localisé en cet endroit."³⁸. Le champ en question est conçu comme un champ de probabilité, aussi bien pour le rayonnement électromagnétique que pour les particules de matière pondérables.

Et Einstein de commenter alors la modification qui s'ensuivit pour les conceptions générales de la physique : "Le prix qu'il a fallu payer pour obtenir ce succès extraordinaire, c'est de renoncer à l'exigence de causalité (qui de toute façon n'est pas vérifiable dans le domaine atomique) et d'abandonner également l'objectif de parvenir à une description réelle des objets physiques dans l'espace et dans le temps".

Il remarquait que ces modifications de conceptions s'inscrivent dans l'histoire du développement des idées en physique³⁹, à l'aide des concepts bien assimilés de la mécanique, la masse, l'accélération, la force, qui s'appliquaient aussi aux corps solides en général, aux fluides et aux autres phénomènes que la mécanique, par l'adjonction d'une théorie "des forces de surface (forces de pression)", qui correspond au traitement de la physique des milieux continus à l'aide du calcul aux dérivées partielles, ainsi que des concepts thermodynamiques de température et de quantité de chaleur. La théorie cinétique et la mécanique statistique permirent -à la fin du XIX^e siècle- de ramener tous ces concepts physiques à ceux de la mécanique, y compris la chimie, dans la mesure où l'on ajouta pour elle "un concept fondamental qui n'était pas fourni par la physique", celui de valence.

La croyance en ces "fondements mécaniques de la physique" paraissait alors assurée, et c'est dans ce cadre, dans cet élan qui pensait accomplir la connaissance de la nature sur cette base, que des progrès substantiels *de la biologie* elle-même furent obtenus. Ces fondement mécanistes furent ensuite remis en cause : la confiance qu'on leur accordait reposait sur une illusion. Cette remise en cause, Einstein ne la mentionne pas toute ici -il n'avait parlé que de physique quantique-, et nous savons qu'elle fut double : par la voie du champ continu et de la théorie de la relativité, restreinte et générale, et par celle des quanta. Il laissait du moins entendre par ce choix -pédagogique, en fonction de son public, qu'intéressait professionnellement la connaissance de la matière organique, de la chimie à la biologie- que la question des fondements de la

³⁸ Einstein [1950], souligné par moi, M.P.

³⁹ Voir par ailleurs Einstein et Infeld [1939].

physique restait ouverte, et qu'elle n'affectait pas directement la biologie.

“Heureusement”, remarquait-il, “la biologie n'a plus besoin aujourd'hui d'aller chercher dans les fondements de la physique des raisons de croire en la possibilité de résoudre ses grands problèmes. Heureusement, car nous savons bien maintenant que la confiance en ces fondements mécanistes reposait sur une illusion ; en dépit de réussites étonnantes dans certains domaines précis, la grande sœur [la physique] n'est plus du tout sûre d'avoir compris l'essentiel de ce qui se passe dans la nature. Pour s'en rendre compte, il suffit d'observer les efforts inhabituels qu'elle fait pour philosopher sur ses propres tâches, comportement qu'elle aurait fièrement refusé il y a cent ans”⁴⁰.

Einstein admettait donc ici l'incertitude présente des fondements de la physique, ce qui voulait dire, pour lui, de la voie qu'il faudrait effectivement suivre pour obtenir une théorie satisfaisante de la matière, qui prendrait en compte à la fois ce qui est assuré en théorie du champ continu -relativité, gravitation- et ce qui l'est dans le domaine de la matière atomique et du rayonnement, c'est-à-dire quantique. Lui-même avait passé des années à essayer dans la première direction, sans aucune certitude que ce fût la bonne. Mais l'incertitude sur ce point ne signifiait pas, à ses yeux, que toute conviction fondée fût pour autant abolie : “N'y a-t-il rien qui soit demeuré immuable dans tous ces changements” de la pensée scientifique, survenus depuis l'époque de Galilée ? La réponse pour lui ne faisait pas de doute : la science “s'est tenue avec constance” à “quelques principes fondamentaux”. Il en dénombrait trois, le premier relatif au rôle de l'*expérience* et à sa nécessité, le second au caractère *spatio-temporel* des représentations, et le troisième à la “*complétude*” des lois, qui revient à assurer que rien dans la nature n'est non-physique.

Ces trois “guides de la pensée scientifiques”, qui perdurent selon lui à travers toutes ses transformations, se rattachent à son “credo épistémologique”⁴¹, en même temps qu'à ses convictions profondes sur la nature de la physique et, au-delà d'elle, de la science en général. Au credo épistémologique se rattache surtout le premier “principe” de la pensée scientifique, qui porte sur l'expérience et sur sa nécessité, mais pour mieux montrer comment celle-ci vient s'inscrire dans le cadre d'une pensée conceptuelle et théorique. Si “par la pensée seule on ne peut pas parvenir à une connaissance des choses objectives”, et si “l'expérience sensible est à la base de toute recherche, et *le contenu de vérité de la pensée théorique* réside exclusivement dans le rapport qu'elle entretient avec l'ensemble de ces expériences”⁴², c'est bien la pensée théorique qui donne la compréhension, l'accès à cette vérité.

Le second principe est que “les concepts élémentaires sont tous de

⁴⁰ Einstein [1950].

⁴¹ Einstein [1946] ; cf. Paty [1993a], chapitre 8.

⁴² Einstein [1950], souligné par moi, M.P.

caractère spatio-temporel”, et que les lois de la nature, basées sur ces concepts, sont universelles en droit, c'est-à-dire qu'elles doivent être compatibles avec tous les faits d'expérience. L'affirmation du caractère élémentairement spatio-temporel des lois est l'expression d'une conviction, celle qui guidait son programme théorique en physique, favorisant la direction du champ défini sur le continuum d'espace-temps. En vérité, les concepts quantiques ne sont pas tous spatio-temporels, mais ils sont construits à partir de transformations de type spatio-temporel : c'est particulièrement le cas pour les grandeurs énergie, moment angulaire, etc. La physique, depuis lors, a mis en avant d'autres grandeurs qui n'ont pas d'équivalents spatio-temporels, mais elles sont également construites sur le modèle de telles grandeurs (opérateurs infinitésimaux). En sorte que l'on peut admettre encore la remarque d'Einstein : “En ce sens, toute pensée scientifique est «géométrique»”.

Quant au troisième principe de la pensée scientifique, il énonce que “les lois physiques sont *complètes*”⁴³, ce qu'il explicite de la manière suivante : “Il n'y a dans le monde aucune loi qui ne puisse, en principe, se ramener aux lois de la sphère conceptuelle spatio-temporelle”. Ce principe de complétude parachève l'expression de la nécessité des lois du second, en exprimant la «fermeture» de ces lois, c'est-à-dire la continuité qui lie les phénomènes de la nature, rapportée en fait à l'unité de la nature. Einstein désigne cette unité par l'appel au caractère irréductiblement spatio-temporel, par lequel se manifeste la continuité qui va du physique inorganique au biologique, ce dernier concernant directement ses auditeurs, médecins et chirurgiens.

Ce principe énonce qu’“il n'y a, dans le système causal des événements” de la nature, y compris les phénomènes et les états psychiques, “aucun élément non physique”, contrairement aux idées de vitalisme ou de “libre-arbitre” (entendu dans le sens que la liberté profiterait des ouvertures de la détermination physique). Il ne s'agit pas ici de réductionnisme du biologique ou du neurophysiologique au physique -Einstein a précisé auparavant, nous l'avons vu, que la biologie n'avait pas à se soumettre à la physique pour résoudre ses problèmes propres-, mais de l'affirmation d'une absence de discontinuité de nature entre les objets de ces disciplines. En particulier, à un niveau d'émergences plus complexes, il concevait le refus d'un libre arbitre qui échapperait aux déterminations naturelles, à la manière dont Spinoza l'exposait dans son *Ethique*⁴⁴.

Einstein insistait d'ailleurs sur ce point en évoquant la théorie quantique, parfois invoquée par les partisans de ce libre arbitre. “L'affaiblissement du concept de causalité qu'implique la théorie moderne des quanta n'ouvre pas la moindre petite porte aux partisans du libre arbitre, ne serait-ce que pour la raison

⁴³ Einstein [1950], souligné par Einstein.

⁴⁴ Cf. Paty [1986a].

suivante : les processus déterminants pour ce qui se produit dans l'organisme, et qui ne sont pas réversibles au sens thermodynamique, sont de telle nature que l'élément statistique que l'on attribue au processus de la sphère moléculaire est pratiquement éliminé". L'argument est, de fait, sans appel. L'"indétermination quantique" est balayée dès que l'on passe au niveau macroscopique où interviennent de grands nombres de molécules et où joue l'irréversibilité.

Tout en affirmant ainsi son "credo des sciences de la nature", Einstein le tempérerait d'un zeste de scepticisme. Ce crédo est-il définitif ? "Je crois qu'un sourire vaut mieux qu'une réponse". Il reste qu'il lui aura soumis toute sa vie de recherche et que, sans lui, on ne saurait plus quoi dire. Le *pari* pascalien n'est peut-être pas loin. Ce qui nous permet de comprendre ce mixte d'esprit critique et sceptique et de conviction pour "des lois dans un univers où quelque chose existe objectivement", qu'il s'efforçait de saisir, à défaut d'autre approche convaincante à ses yeux, de manière "sauvagement spéculative"⁴⁵, c'est-à-dire par une voie conceptuelle et théorique indirecte.

⁴⁵ Einstein, lettre à Max Born, 7.9.1944, in Einstein, Born [1969], tr. fr., p. 165.

BIBLIOGRAPHIE

(Remarque : les éditions d'œuvres réunies d'Einstein sont désignées par CP (*Collected Papers*, cf. Einstein [1987-]) et OC (*Oeuvres choisies*, trad. en français, cf. Einstein [1989-1993]).

BELL, John [1987]. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

BOHR, Niels; KRAMERS, Hendrik Anton and SLATER, John Clarke [1924]. The quantum theory of radiation, *The Philosophical Magazine* 47, 1924, 785-822.

BORN, Max [1926a]. Quanten Mechanik der Stössvorgänge, *Zeitschrift für Physik* 38, 1926, 803-827 ; également in Born [1963], vol. 2, p. 233-258. Trad. angl., Quantum mechanics of collision processes, in Ludwig, G., *Wave Mechanics*, Pergamon Press, London, 1968.

- [1926b]. Das Adiabatenprinzip in der Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* 40, 1926, 167-192 ; également in Born [1963], vol. 2, p. 258-283.

- [1927]. Quantenmechanik und Statistik, *Naturwissenschaftlich* 15, 1927, 238-242.

- [1949]. *Natural philosophy of cause and chance*, Clarendon Press, Oxford, 1949.

- [1963]. *Ausgewählte Abhandlungen*, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1963, 2 vols.

- et WOLF, E. [1959]. *Principles of optics*, Pergamon Press, London, 1959.

BOTHE, W. et GEIGER, H. [1924]. Ein Weg zu experimentellen Nachprüfung der Theorie von Bohr, Kramers und Slater, *Zeitschrift für Physik* 26, 1924, 44. Trad. angl. : Experimental test of the theory of Bohr, Kramers and Slater, in Lindsay 1979, p. 230-231.

- [1925]. Über das Wesen des Comptoneffekts ; eine experimentelles Beitrag zur Theorie des Strahlung, *Naturwissenschaft* 13, 1925, 440- ; *Zeitschrift für Physik* 32, 1925, 639-663.

DE BROGLIE, Louis [1924]. *Recherches sur la théorie des quanta*, Thèse, Paris, 1924 ; *Annales de physique*, 10^{ème} série, 3, 1925, 22-128 ; ré-éd., Masson, Paris, 1963.

DIRAC, Paul A. M. [1930]. *The principles of quantum mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 1930. 4th ed., 1958. Trad. fr. par Alexandre Proca et Jean Ullmo, *Les principes de la mécanique quantique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1931.

EINSTEIN, Albert [1903]. Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik, *Annalen der Physik*, ser. 4, XI, 1903, 170-187. (CP 2, p. 77-94). Trad. fr. (partielle), Une théorie des fondements de la thermodynamique, OC, 1, p. 18-28.

- [1905a]. Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden

- heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 132-148. (CP, 2, p. 150-166). Trad. fr., Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière, O.C., 1, p. 39-53.
- [1905b]. Ueber die von der molekular kinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 549-560. (CP, 2, p. 224-235). Trad. fr., Mouvement des particules en suspension dans un fluide au repos impliqué par la théorie moléculaire cinétique de la chaleur, OC, 1, p. 55-64.
 - [1905c]. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVII, 1905, 891-921. (CW, 2, p. 276-306). Trad. fr., Sur l'électrodynamique des corps en mouvement, OC, 2, p. 31-58.
 - [1905d]. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?, *Annalen der Physik*, ser. 4, XVIII, 1905, 639-641. (CW, 2, p. 312-314). Trad. fr., L'inertie d'un corps dépend-elle de sa capacité d'énergie?, OC, 2, p. 60-62.
 - [1906]. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption, *Annalen der Physik*, ser. 4, XX, 1906, 199-206. (CW, 2, p. 350-357). Trad. fr. (partielle), Théorie de la production et de l'absorption de la lumière, OC, 1, p. 68-72.
 - [1907a]. Die Planck'sche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme, *Annalen der Physik*, ser. 4, XXII, 1907, 180-190 [Reçu le 9 nov. 1906] ; 800 (Berichtigung, erratum). (CP, 2, p.). Trad. fr., La théorie du rayonnement de Planck et la théorie des chaleurs spécifiques, in Einstein 1989 a, p. 75-84.
 - [1907b]. Ueber die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie, *Annalen der Physik*, ser. 4, XXIII, 1907, 371-384. (CP, 2, p. 414-427).
 - [1909]. Ueber die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung, *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen* 7, 1909, 482-500 ; également, *Physikalische Zeitschrift*, X, 1909, 817-825. [Conférence de Salzbourg, 21 nov. 1909.] (CP, 2, p. 564-582). Trad. fr., L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement, OC, p. 86-100.
 - [1912]. Etat actuel du problème des chaleurs spécifiques, suivi de Discussion du rapport, in de Broglie, M. et Langevin, P. (eds.), *La théorie du rayonnement et les quanta. Communications et discussions de la réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911, sous les auspices de M.E. Solvay*, Gauthier-Villars, Paris, 1912, p. 407-450. Texte allemand original, Zum gegenwärtigen Stande des Problems des spezifischen Wärme, *Deutsche Bungenesellschaft, Abhandlung*, n° 7, 1914, 330-364.
 - [1916a]. Strahlung-emission und -absorption nach der Quantentheorie, *Deutsche physikalische Gesellschaft, Verhandlungen*, XVIII, 1916, 318-323.
 - [1916b]. Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Gesellschaft Mitteilungen* (Zürich), 1916, 47-62 ; également *Physikalische Zeitschrift* XVIII, 1917, 121-128. Trad. fr. par Michel Dembno-Tchaïkowsky et Daniel Fargue, Sur la théorie quantique du rayonnement, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 4, 1979, 65-83. Autre tr. fr., OC, 2, Théorie quantique du rayonnement, p. 134-147.
 - [1917]. Zum Quantensatz von Sommerfeld und Epstein, *Deutsche physikalische*

Gesellschaft, Verhandlungen XIX, 1917, 82-92. Trad. fr., Sur la condition de quantification de Sommerfeld et Epstein, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 11, 1986, 261-.

- [1924]. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte* 22, 1924, 261-267. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique, OC, p. 172-179.

- [1925a]. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 3-14. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique. Deuxième mémoire, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 7, 1982, 129-145. Autre trad. fr. (partielle), Théorie quantique du gaz parfait. Deuxième mémoire, OC, p. 180-192.

- [1925b]. Quantentheorie des idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 18-25.

- [1926f]. Observações sobre a situação actual da theoria da luz, *Revista da Academia brasileira de ciencias*, n°1, 1926 (avril), p. 1-3. Original en allemand : “Bemerkungen zu der gegenwärtigen Lage der Theorie des Lichtes”, manuscrit reproduit en fac-similé par Alfredo T. Tomlasquin et Ildeu C. Moreira, *Ciência hoje* (São Paulo), vol. 21, 1997, n°124, 25-27. [Communication à l'Académie brésilienne des sciences, 7 mai 1925.]

- [1928]. Interventions au Cinquième Conseil Solvay de 1927, in *Electrons et photons* 1928, p. 253-256, 266. Repris (en partie), OC, p. 210-211.

- [1936]. Physik und Realität, *Franklin Institute Journal*, CCXXI, 1936, 313-347. Trad. fr., Physique et réalité, in OC, 5, p. 125-151.

- [1946]. Autobiographisches. Autobiographical notes, in Schilpp, P.A. (ed), *Albert Einstein, philosopher and scientist*, The Library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949, p. 1- 95. [Texte rédigé en 1946].

- [1949]. Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume, in Schilpp 1949, p. 663-693. [Trad. angl. par P. A. Schilpp, d'après l'original allemand, Bemerkungen zu den in diesen bande Vereinigten Arbeiten, in édition de Schilpp 1949 en allemand, p. 493-511].

- [1950]. Physics, philosophy and scientific progress, *Journal of the International College of Surgeons* 14, 1950 (december), 755-758. [Allocution à la 15è assemblée de l'United States Chapter de l'International College of Surgeons, Cleveland, Ohio, Civic auditorium, nov. 1950. Original en allemand, archives Einstein, n° 164]. Tr. fr., La physique et les autres sciences, OC, vol. 5, p. 158-163.

- [1953]. Einleitende Bemerkungen über Grundbegriffe. Remarques préliminaires sur les principes fondamentaux (trad. fr. par Marie-Antoinette Tonnelat), in *Louis de Broglie, physicien et penseur*, Albin Michel, Paris, p. 4-15.

- [1987-]. *The Collected Papers of Albert Einstein*, ed. by J. Stachel, D.C. Cassidy, R. Schulmann, M. Klein et al., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987-, 5 vols. parus jusqu'à 1993. (Chaque volume est accompagné d'un vol. “English translation”). Désigné par CP.

- [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, éd. par F. Balibar et al, Seuil/CNRS, Paris, 1989-1993, 6 vols. Désigné par OC.

EINSTEIN, Albert ; PODOLSKY, Boris and ROSEN, Nathan [1935]. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?, *Physical Review* , ser. 2, XLVII, 1935, 777-780. Trad. fr., Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ?, OC, p. 224-230.

EINSTEIN, Albert et INFELD, Leopold [1938]. *The evolution of physics: the growth of ideas from early concepts to relativity and quanta*, Simon and Schuster, New York, 1938. Texte allemand, *Die Physik als Abenteuer der Erkenntnis*, Sijthoff, Leiden, 1938. Trad. fr. par Maurice Solovine, *L'évolution des idées en physique, des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta*, Flammarion, Paris, 1938.

EINSTEIN, Albert et BORN, Max [1969]. *Briefwechsel 1916-1955*, Nymphenburger Verlagshandlung, München, 1969. Trad. fr. par P. Leccia, *Correspondance 1916-1955, commentée par Max Born*, Seuil, Paris, 1972.

EINSTEIN, Albert et BESSO, Michele [1972a]. *Correspondance 1903-1955* , publiée par P. Speziali, Hermann, Paris, 1972.

ELECTRONS ET PHOTONS [1928]. *Electrons et photons. Rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l'Institut international de physique Solvay*, Gauthier-Villars, Paris, 1928.

JAMMER, Max [1966]. *The conceptual development of quantum mechanics*, Mc Graw-Hill, New York, 1966.

KUHN, Thomas [1978]. *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*, Clarendon Press, New York, 1978.

LANGEVIN, Paul [1904]. La physique des électrons (communication présentée au Congrès international des arts et des sciences, Saint Louis, Missouri, 23 septembre 1904), *Revue générale des sciences*, 15 mars 1905. Repris in Langevin [1923], p. 1-69.

- [1923]. *La physique depuis vingt ans*, Doin, Paris, 1923.

LINDSAY, Robert (ed.) [1979]. *Early concepts of energy in atomic physics*, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsbury (Penns.), 1979.

PAIS, Abraham [1982]. *Subtle is the Lord. The science and life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982.

-[1994]. *Einstein lived here*, Oxford University Press, Oxford, 1994.

PATY, Michel [1985]. Einstein et la complémentarité au sens de Bohr : du retrait dans le tumulte aux arguments d'incomplétude, *Revue d'histoire des sciences* 38, 1985 (n° 3-4, *La Complémentarité*), 325-351.

- [1986a]. Einstein and Spinoza, in Grene Marjorie and Nails, Debra (eds), *Spinoza and the sciences*, Reidel, Dordrecht, 1986, p. 267-302.

- [1986b]. La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique, *Fundamenta Scientiae*, 7, 1986, 47-87.

- [1988a]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.
 - [1988b]. Sur la notion de complétude d'une théorie physique, in Fleury, Norbert ; Joffily, Sergio ; Martins Simões, J.A. and Troper, A. (eds), *Leite Lopes Festschrift. A pioneer physicist in the third world*, World Scientific Publishers, Singapore, 1988, p. 143-164.
 - [1993a]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.
 - [1993b]. Sur les variables cachées de la mécanique quantique: Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie, *La Pensée*, n°292, mars-avril 1993, 93-116.
 - [1995]. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics, *Foundations of physics* 25, 1995, n°1 (january), 183-204.
 - [1996a]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
 - [1996b]. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470.
 - [à paraître]. *Einstein, les quanta et le réel. Critique et construction théorique*.
- PAULI, Wolfgang [1949]. Einstein's contribution to Quantum theory, in Schilpp 1949, p. 147-160. Texte original: Einstein Beitrag zur quantentheorie, in Schilpp 1949, ed. en allemand 1955, p. 74-83 ; également in Pauli [1964], vol. 1, p. 1013-1022.
- [1964]. *Collected scientific papers*, edited by R. Kronig and V.F. Weisskopf, 2 vols., Interscience/Wiley and sons, New York, 1964.
- PERRIN, Jean [1909]. Mouvement brownien et réalité moléculaire, *Annales de chimie et de physique*, 8ème série, n° 18, 1909, 1-114 ; repris in Perrin, J., *Oeuvres scientifiques*, éd. du C.N.R.S., Paris, 1950, p. 171-239.
- [1913]. *Les atomes* (1913), nouv. éd., Gallimard, Paris, 1970.
- SCHILPP, Paul Arthur (ed.) [1949]. *Albert Einstein, philosopher-scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949. Ré-ed., *Ibid.* and Cambridge University Press, London. [Third edition, 1970]. Trad. en allemand, *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1955.
- SCHRÖDINGER, Erwin [1926]. *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, Barth, Leipzig, 1926 ; 1928. Trad. fr. par A. Proca, *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, Alcan, Paris, 1933.
- STACHEL, John [1986]. Einstein and the quantum : fifty years of struggle, in Colodny, Robert (ed.), *From quarks to quasars*, University of Pittsburg Press, Pittsburg, 1986.