



HAL
open science

Champ continu et quanta : les deux approches théoriques de la matière selon Einstein.

Michel Paty

► **To cite this version:**

Michel Paty. Champ continu et quanta : les deux approches théoriques de la matière selon Einstein. : Le rapport de la théorie à son objet. Champ continu et quanta : les deux approches théoriques de la matière selon EinsteinLe rapport de la théorie à son objet, 2005, Tunis, Tunisie. p. 75-95. halshs-00167261

HAL Id: halshs-00167261

<https://shs.hal.science/halshs-00167261>

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 Bachtá, Abdelkader (éd.), *La science einsteinienne : ses origines, son contenu et sa portée, Actes du Colloque*, Université de Tunis, 12-14 décembre 2005

Champ continu et quanta : les deux approches théoriques de la matière selon Einstein

Le rapport de la théorie à son objet

Michel PATY*

Résumé.

Les trois articles pionniers publiés par Einstein en 1905, sur la théorie moléculaire, les quanta de lumière et la relativité restreinte, portent sur trois objets différents, exactement délimités, pour lesquels sont proposés trois modes spécifiques d'approche théorique. Les recherches ultérieures du savant distingueront toujours, dans la même ligne de pensée, le domaine atomique et quantique et celui du champ continu, malgré sa conception de l'unité de la matière et sa préoccupation pour une théorie unifiée. On peut y voir une caractéristique de son style scientifique propre, où la dimension critique accompagne la perspective d'un enserrement théorique étroit de l'« objet » physique considéré. La pensée critique prépare une construction théorique sur la base de concepts et de principes physiques identifiés. La séparation corrélatrice des approches théoriques pour des objets de nature différente (comme le champ continu et les phénomènes quantiques) apparaît comme l'effet d'une pensée du rapport d'adéquation au plus juste (stricte et « complète », dans un sens bien défini) entre la théorie et l'objet qu'elle se propose de décrire et d'expliquer.

MOTS-CLES.- Champ continu, Einstein, Physique moléculaire et atomique, Probabilité physique, Quanta, Rapport théorie-objet, Rayonnement électromagnétique, Relativité, Style scientifique, Unité théorique.

* Directeur de recherche émérite au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (EQUIPE REHSEIS, UMR 7596, et Université Paris 7-Denis Diderot), Paris, France ; et Professor Visitante, Departamento de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo (SP), Brasil.

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.

Nous voudrions montrer dans ce qui suit comment cette séparation méthodologique est révélatrice du « style scientifique » propre d'Einstein, que l'on peut résumer dans ses traits principaux comme suit. La dimension critique accompagne la perspective d'un enserrement théorique étroit de l'« objet » physique considéré ; la pensée critique prépare une construction théorique sur la base de concepts et de principes physiques identifiés ; la séparation corrélatrice des approches théoriques pour des objets de nature différente (comme le champ continu et les phénomènes quantiques) apparaît comme l'effet d'une pensée du rapport d'adéquation au plus juste (stricte et « complète », dans un sens bien défini) entre la théorie et l'objet qu'elle se propose de décrire et d'expliquer.

L'objet de la théorie physique : deux approches de la matière et une question de style théorique

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 de l'âge mûr¹. 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,

¹ 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.

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 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 témoignent de l'unicité -en profondeur- de l'objet à l'étude, par-delà les possibilités de traitement théorique.

Trois travaux séparés 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 Hendryk 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 électromagnétique².

Dans ses propres recherches de cette époque sur ces problèmes, 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 entraînaient, 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 (Ω). 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 temps³. 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

² Conférence de Langevin au Congrès international des arts et des sciences, Saint Louis du Missouri, en 1904 : voir Langevin [1904].

³ 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.

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)⁴. Dans un premier 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 ($\epsilon = h\nu$)⁵.

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. Une telle 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 physiques* adoptés : soumission qui se traduisait par des contraintes sur leur forme ou expression mathématique, réduisant leurs possibilités a priori, conformément à leur nature désormais précisée d'être des *grandeurs physiques*.⁶

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

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

5 Einstein [1905a].

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

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 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 rayonnement⁷. 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"⁸. 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

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

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

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 abordés⁹.

Angles d'approche et recouvrements théoriques

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"¹⁰. 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"¹¹. Il reprenait ce résultat, dont il donnait une nouvelle démonstration, basée sur la cinématique : "La masse inerte d'un corps diminue de $\frac{E}{c^2}$ lorsque celui-ci émet l'énergie rayonnante L ". Il rappelait aussi l'invariance du rapport entre l'énergie et la fréquence, $\frac{E}{h\nu}$ -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 autonome¹².

"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'explicitement les relations qui viennent de la cinématique, mais restait muette sur la dynamique.

9 Paty [1993a, et à paraître].

10 Einstein [1909].

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

12 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).

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 quanta, et “notre théorie classique (électromagnétique) de la lumière est incapable d'expliquer certaines propriétés fondamentales des rayons lumineux”¹³.

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 classique¹⁴. 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 quantique¹⁵.

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 ¹⁶), quand il se fût persuadé qu'elles étaient totalement établies¹⁷. 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

13 Einstein [1909].

14 Einstein [1906].

15 Einstein [1916a et b].

16 x représente les coordonnées d'espace, p l'impulsion, h la constante de Planck réduite.

17 Cf. Paty [1985].

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 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 la 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 matière¹⁸.

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...

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*

18

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 inexplicée entre des particules localisées différemment dans l'espace -dans des dimensions atomiques¹⁹.

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 tard²⁰.

Quand à la non-localité, il en releva une manifestation, dès 1927, à propos du phénomène d'interférence d'électrons par diffraction et de l'interprétation statistique de la fonction d'onde, formulée en 1926 par Max Born, d'ailleurs inspirée par une suggestion d'Einstein lui-même²¹. 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 individuel²². 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, la 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

19 Einstein [1924, 1925a et b].

20 *Ibid.*

21 Born [1926a et b]. 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].

22 Einstein [1928]. Cf. Paty [1985].

veut maintenir une correspondance biunivoque entre le sous-système et sa 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 quantiques²³.

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 classique²⁴. 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 fondamentale²⁵.

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

²³ Bell [1987]. Cf. Paty [1986, 1988a, 1995].

²⁴ Bohr, Kramers, Slater [1924], Geiger et Bothe [1924, 1925], Einstein [1926]. Cf. Paty [à paraître].

²⁵ 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]).

particulier qu'elle répondît à la nécessité de décrire des systèmes physiques 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 quantiques²⁶.

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 relevé²⁷-, 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"²⁸. 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 arrière²⁹.

26 Paty [1988a, 1986, et à paraître].

27 Einstein [1949].

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

29 Mais même ceux qui, comme Pauli, prêtaient l'oreille à cet aspect de la position

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 arbitraire³⁰.

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.

Ces indications sur la manière dont Einstein « pensait la matière » dans son travail scientifique devraient être prolongées par l'évocation de ses conceptions épistémologiques et philosophiques plus générales sur le même sujet, concernant les approches des autres disciplines (notamment la chimie et la biologie) et leur rapport à la matière selon la physique, dans la perspective de l'unité de la matière et de la connaissance de la nature en général. Mais cela dépasserait les limites que nous nous étions fixées dans le présent travail³¹.

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.

d'Einstein, n'iaient que cela fût vrai (cf. Pauli [1949], in Schilpp 1949, p. 158). Sur le programme d'Einstein, voir Paty [1995].

³⁰ Paty [1988b, 1993a].

³¹ Paty [1993], chapitre 9 ; [2000].

- BOHR, Niels; KRAMERS, Hendrik Anton and SLATER, John Clarke [1924]. The quantum theory of radiation, *The Philosophical Magazine* 47, 1924, 785-822.
- BORN, Max [1924]. Ueber Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* 26, 1924, 379-395. Également in Born [1963], vol. 2, p. 61-77.
- 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.
- BORN, Max [1926b]. Das Adiabatenprinzip in der Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* 40, 1926, 167-192 ; également in Born [1963], vol. 2, p. 258-283.
- BORN, Max [1927]. Quantenmechanik und Statistik, *Naturwissenschaftlich* 15, 1927, 238-242.
- BORN, Max [1949]. *Natural philosophy of cause and chance*, Clarendon Press, Oxford, 1949.
- BORN, Max [1963]. *Ausgewählte Abhandlungen*, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1963, 2 vols.
- 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.
- BOTHE, W. et GEIGER, H. [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.
- 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.
- EINSTEIN, Albert [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.
- EINSTEIN, Albert [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.
- EINSTEIN, Albert [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.
- EINSTEIN, Albert [1905d]. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhändig ?, *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.

EINSTEIN, Albert [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.

EINSTEIN, Albert [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.

EINSTEIN, Albert [1907b]. Ueber die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie, *Annalen der Physik*, ser. 4, XXIII, 1907, 371-384. (CP, 2, p. 414-427).

EINSTEIN, Albert [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.

EINSTEIN, Albert [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 der spezifischen Wärme, *Deutsche Bunsengesellschaft, Abhandlung*, n° 7, 1914, 330-364.

EINSTEIN, Albert [1916a]. Strahlung-emission und -absorption nach der Quantentheorie, *Deutsche physikalische Gesellschaft, Verhandlungen*, XVIII, 1916, 318-323.

EINSTEIN, Albert [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.

EINSTEIN, Albert [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-.

EINSTEIN, Albert [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.

EINSTEIN, Albert [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.

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

EINSTEIN, Albert [1926f]. Observações sobre a situação actual da theoria da luz, *Revista da Academia brasileira de ciencias*, n°1, 1926 (abril), 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.]

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

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

EINSTEIN, Albert [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].

EINSTEIN, Albert [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].

EINSTEIN, Albert [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.

EINSTEIN, Albert [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.

EINSTEIN, Albert [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 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.

LANGÉVIN, 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.

LANGÉVIN, Paul [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.

PAIS, Abraham [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.

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

PATY, Michel [1988a]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.

PATY, Michel [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.

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

PATY, Michel [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.

PATY, Michel [1995]. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics, *Foundations of physics* 25, 1995, n°1 (january), 183-204.

PATY, Michel [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.

PATY, Michel [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.

PATY, Michel [2000]. Einstein et la pensée de la matière, in Monnoyeur, Françoise (éd.), *La matière des physiciens et des chimistes*, Le Livre de poche, Hachette, Paris, 2000, p. 213-252.

PATY, Michel [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.

PAULI, Wolfgang [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.

PERRIN, Jean [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.

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.