

PHILOSOPHIA SCIENTIÆ

LÉNA SOLER

Les quanta de lumière d'Einstein en 1905, comme point focal d'un réseau argumentatif complexe

Philosophia Scientiæ, tome 3, n° 3 (1998-1999), p. 107-144

http://www.numdam.org/item?id=PHSC_1998-1999__3_3_107_0

© Éditions Kimé, 1998-1999, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Philosophia Scientiæ* » (<http://poincare.univ-nancy2.fr/PhilosophiaScientiæ/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

Les quanta de lumière d'Einstein en 1905, comme point focal d'un réseau argumentatif complexe

Léna Soler

Archives Poincaré - Université Nancy 2

Résumé : l'hypothèse des quanta de lumière introduite par Einstein en 1905 est ici présentée comme le point de convergence de huit lignes argumentatives – l'expression désignant des raisonnements (soit explicites, soit reconstitués par l'historien des sciences) qui, pris ensemble, conduisent Einstein à prendre très au sérieux l'idée d'une structure discontinue de la lumière, en dépit du fait qu'ils ne sont pas tous ni des démonstrations physiques irréprochables, ni des inférences logiquement valides, ni même des développements plausibles aux yeux des membres de la communauté scientifique d'alors. L'épisode historique ainsi analysé met en évidence sur un exemple précis la complexité du processus d'élaboration des théories scientifiques et la diversité des facteurs qui y interviennent.

Abstract : The hypothesis of light quanta introduced by Einstein in 1905 is presented as the focal point of eight 'argumentative lines' - this last expression referring to reasonings (either explicit or reconstructed by the historian) which, taken together, lead Einstein to take very seriously the idea of a discontinuous structure of light, despite the fact that they are neither irreproachable physical demonstrations, nor logically valid inferences, nor even plausible developments according to the members of the scientific community at the time. So analysed, this historical episode shows, via a process of scientific theories and the diversity of the factors which intervene in it.

En 1905, Einstein introduit en physique l'ancêtre du photon : le quantum de lumière, quantité d'énergie insécable, localisée et en mouvement. Cet épisode de l'histoire des débuts de la physique quantique sera dans ce qui suit présenté et mis en perspective. D'un point de vue plus philosophique, l'objectif est de faire apparaître l'hypothèse des quanta de lumière comme le point de convergence d'un certain nombre de lignes argumentatives à divers égards hétérogènes, ces lignes étant supposées, articulées entre elles et prises toutes ensemble, avoir incité Einstein non seulement à *formuler*, mais aussi à *prendre au sérieux* l'hypothèse, révolutionnaire en 1905, des quanta de lumière¹.

C'est à défaut d'une meilleure expression que je parle de 'lignes argumentatives'. Dans la mesure où les raisonnements en question ne sont pas tous explicités par Einstein et ne sont d'ailleurs même pas toujours logiquement valides, le terme d' 'argument' peut paraître abusif. Peut-être serait-il plus rigoureux de s'en tenir à mentionner un réseau de facteurs hétérogènes. L'expression de 'lignes argumentatives' a néanmoins l'avantage de souligner que les facteurs considérés fonctionnent *aux yeux d'Einstein* comme des arguments, c'est-à-dire concourent à convaincre le physicien du bien-fondé de son hypothèse.

Je commencerai par présenter séparément chacune des huit lignes constitutives du réseau argumentatif proposé. Je montrerai alors comment ces lignes s'articulent entre elles pour converger vers l'hypothèse des quanta de lumière. Ce n'est ainsi qu'en fin de parcours que chacune des pièces du puzzle, d'abord considérée isolément, recevra sa pleine signification de la place occupée au sein de la structure argumentative d'ensemble. Le lecteur est donc invité à s'armer de patience en attendant.

L'analyse ainsi conduite témoigne de la complexité du processus d'élaboration des théories scientifiques, et illustre la diversité des ingrédients qui le constituent. Elle met notamment en évidence la *marge de liberté* dont dispose le physicien face à un ensemble de données théoriques et expérimentales, le caractère *créateur* de la pensée physique, et le rôle fondamental joué par divers facteurs subjectifs – exigences esthétiques,

¹ Le présent article reprend en les présentant quelque peu différemment certains développements de ma thèse de Doctorat, *L'émergence d'un nouvel objet symbolique : le photon*, effectuée sous la direction de Michel Bitbol, et soutenue à l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne en décembre 1997. Le réseau argumentatif ici proposé a été réduit à l'essentiel et pourrait encore être étoffé.

raisonnements logiquement non valides mais psychologiquement convaincants, etc.

Présentation générale de l'article heuristique de 1905

La plupart des lignes argumentatives qui vont être convoquées figurent explicitement ou se lisent en filigrane dans l'article, adressé aux *Annalen der Physik* en 1905, où Einstein introduit pour la première fois les quanta de lumière. Aussi vais-je commencer par présenter brièvement et par caractériser la structure d'ensemble de cet article bien connu, intitulé «Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière»².

L'article heuristique de 1905 marque le début d'une série de tentatives, pour saisir la structure de la lumière³, ou plus exactement du rayonnement électromagnétique. Einstein y propose, sous forme de conjecture, une alternative radicalement nouvelle au modèle maxwellien alors en vigueur. Dans ce modèle, qui en 1905 règne en maître et que personne ne songe à contester fondamentalement, la lumière est une onde électromagnétique, c'est-à-dire une énergie continûment répandue dans l'espace, qui se dilue toujours davantage dans cet espace au fur et à mesure de la propagation. A l'opposé, Einstein conçoit l'énergie lumineuse comme constituée «d'un nombre fini de quanta [*Lichtquant*] localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que tout d'un bloc» [Einstein 1905a, trad. fr. p. 40]. L'énergie électromagnétique, une fois émise par la matière, est donc supposée rester concentrée en certains points, bref, être distribuée de manière discrète dans l'espace.

L'argument procède en deux temps logiques.

- Le premier est essentiellement *critique* : il met en évidence certaines difficultés et absurdités des théories physiques alors en vigueur – théories à l'époque estimées solidement établies par la grande majorité des physiciens.
- Le second est plus *constructif*. Il se laisse lui-même scinder en deux moments : 1/ une nouvelle représentation (discrète et non plus continue) de l'énergie lumineuse est proposée ; 2/

² [Einstein 1905a]. Pour une analyse globale de ce travail d'Einstein, voir [Klein, 1963].

³ Pour une vue d'ensemble des représentations de la lumière de l'antiquité jusqu'à nos jours, voir [Maitte, 1981].

Cette représentation est appliquée avec succès à un certain nombre de situations physiques, notamment à l'effet photoélectrique.

Première ligne argumentative (L1) : seules ont une chance d'atteindre 'le fond des choses' les théories physiques dotées de fondements unifiés et exemptes d'asymétries théoriques n'ayant pas de contrepartie empirique

La première ligne argumentative n'est pas un argument explicite de l'article heuristique. Elle se manifeste toutefois de manière indirecte dans certains des propos qui y figurent.

G. Holton et les préférences thématiques

L1 met en jeu certaines exigences «thématiques» propres à Einstein. J'emprunte l'adjectif «thématique» à Gerald Holton, lequel pose l'existence de couples ou de triplets de «thémata antithétiques» : atomisme / continu ; invariance / évolution / catastrophisme ; simplicité / complexité ; etc. Des préférences thématiques signifient l'attrait particulier pour l'un des pôles d'un couple ou d'un triplet de ce type. Elles sont en fait des préférences esthétiques en un sens extrêmement large du terme.

«Dans l'œuvre de bien des savants (...), on relève cet aspect fondamental d'une adhésion à des thémata, en nombre fort restreint»⁴, écrit Holton. Les scientifiques visent ainsi des théories *simples*, ou des théories *unifiées*, ou des modèles *continus*, ou des représentations *discrètes*, etc. Ceci les conduit, dans les cas où diverses alternatives sont logiquement possibles, à prendre telle décision théorique plutôt que telle autre, à se positionner de telle ou telle manière dans les polémiques scientifiques.

Pour Holton, les thémata sont des *formes invariantes de l'imagination humaine*, qui se retrouvent dans tous les domaines de la pensée (pas seulement en sciences, mais aussi par exemple dans les œuvres littéraires), et qui peuvent être répertoriés car ils sont en nombre relativement limité.

⁴ [Holton 1981b, p. 9]. Holton propose une analyse thématique des conceptions einsteiniennes, dans [Holton 1981a].

Deux exigences thématiques fondamentales aux yeux d'Einstein

Les thémata de l'*unité* et de la *simplicité* sont chez Einstein absolument fondamentaux. Ils dirigent toute la recherche, et sont comme on va le voir, associés à d'autres facteurs, à l'origine d'un certain nombre de points de vue einsteiniens atypiques. Ils se manifestent et se combinent dans quelques exigences complexes explicitées par Einstein lui-même. Toute théorie physique 'digne de ce nom' doit ainsi d'après Einstein satisfaire au moins deux conditions essentielles :

1/ Etre dotée de fondements simples et unifiés.

«Le but de la science, écrit par exemple Einstein en 1936, est, d'une part, la compréhension, aussi complète que possible, et la mise en relation des expériences sensibles dans toute leur variété, et, d'autre part, le parachèvement de ce but *en employant un minimum de concepts primaires et de relations*. (En cherchant, autant que possible, l'unité logique dans l'image du monde, c'est-à-dire la simplicité logique de ses fondements)» [Einstein 1936, p. 26].

Cet idéal einsteinien, maintes fois réaffirmé, est sans conteste *réductionniste*. L'expérience nous met en présence d'une très grande diversité de phénomènes, lesquels sont coordonnés à un très grand nombre d'énoncés. Le scientifique a avant tout pour tâche de *réduire* cette multitude d'énoncés à un nombre aussi petit que possible de propositions fondamentales *commensurables* et *non contradictoires*. Celles-ci doivent permettre, combinées entre elles, l'édification d'un modèle *cohérent* et *unifié* de la réalité physique, duquel puisse être déduite l'*intégralité* des données empiriques.

Tout repose, on le voit, sur la nature des fondements, ceux-ci étant comme un condensé de la théorie déployée. D'où la concentration de l'effort einsteinien sur l'unité et la simplicité *des propositions premières de la physique*.

2/ Supprimer les asymétries théoriques n'ayant pas de contrepartie empirique

Cette seconde exigence thématique est étroitement liée à la précédente, mais ne s'y réduit cependant pas. L'exemple bien connu d'«asymétries qui ne semblent pas inhérentes aux phénomènes» [Einstein 1905b, p. 31], explicité par Einstein en juillet 1905 dans son tout premier article sur la relativité et par la suite très souvent invoqué, est celui de l'interaction entre un aimant et un conducteur.

A s'en tenir aux seules données de l'expérience, seul compte le mouvement relatif du conducteur et de l'aimant : que l'on considère que c'est le premier qui se déplace par rapport au second ou bien l'inverse, le phénomène observable est toujours le même (un courant est induit dans le circuit conducteur). Et pourtant, «l'interprétation théorique du phénomène n'est pas du tout la même dans les deux cas» [Einstein 1919, p. 30, note 6] : dans un cas, c'est un champ électrique qui est supposé être à l'origine de la génération du courant ; tandis que dans l'autre, c'est une force électromotrice (ou, pour simplifier, un champ magnétique). «L'idée que l'on avait affaire ici à deux cas de nature différente m'était intolérable» [*Ibid.*], déclarera Einstein en 1919.

L'impératif thématique est en fin de compte le suivant : quand les données expérimentales semblent indiquer une symétrie, la théorie ne doit *pas* recourir à des explications *dissymétriques*.

Exigences thématiques et arguments pour ou contre les théories physiques

Les deux exigences thématiques centrales – désir de doter la physique de fondements unifiés et impératif d'éliminer les asymétries théoriques n'ayant pas de corrélat observationnel – ne sont évidemment pas *en elles-mêmes* des arguments. Mais elles le deviennent, dans la mesure où du point de vue d'Einstein, toute théorie physique *digne de ce nom* doit satisfaire les deux exigences thématiques considérées.

Non conforme à ces exigences, une théorie physique, en admettant qu'elle permette des prédictions exactes corroborées, ne peut en effet selon Einstein être acceptée que *provisoirement et faute de mieux*, en tant que recette efficace. Mais il est inconcevable qu'elle atteigne, selon une expression dont Einstein use parfois, «le fond des choses» (développer ce point exigerait d'examiner de plus près la nature du réalisme d'Einstein). Les deux prescriptions thématiques examinées fonctionnent donc bien, associées à d'autres considérations, comme des arguments en faveur ou en défaveur des théories physiques.

Application de *LI* à une théorie particulière (*LI'*) : l'électromagnétisme de Lorentz n'atteint pas le fond des choses, car ses fondements sont duels et qu'elle présente des asymétries n'ayant pas de contrepartie empirique

Il existe en 1905 plusieurs versions de l'électromagnétisme. La théorie de l'électron de Lorentz, qui constitue le cadre de la partie critique de l'article heuristique d'Einstein, est l'une des principales d'entre elles.

La théorie de l'électron de Lorentz

Lorentz, dans la dernière décennie du 19^{ème} siècle, associe aux équations de Maxwell une interprétation physique microscopique qui réhabilite les particules chargées et conçoit les courants comme des mouvements de telles particules. Ces porteurs de charge, tout d'abord appelés 'ions', sont à partir de 1899 nommés 'électrons' par Lorentz⁵, et la théorie dans laquelle ils interviennent, la 'théorie de l'électron de Lorentz' (ou électromagnétisme de Lorentz).

Dans la théorie de Lorentz, la matière ordinaire est supposée composée d'entités *discrètes* dont certaines au moins sont chargées. La lumière est vue comme une onde électromagnétique se propageant dans l'éther, milieu *continu* remplissant tout l'espace, qu'il y ait ou non présence de matière. Le mouvement des particules chargées produit la lumière, par conversion de l'énergie cinétique des entités matérielles en énergie électromagnétique. Les propriétés macroscopiques (électromagnétiques et optiques) des milieux matériels sont obtenues en effectuant des moyennes sur les processus microscopiques.

L'électromagnétisme de Lorentz simplifie considérablement la conception des interactions rayonnement-matière qui valait dans le paradigme maxwellien. Sans entrer dans les détails, disons seulement qu'en raison de la simplification introduite et des nombreux succès remportés par la théorie de l'électron, les physiciens faisaient au début du 20^{ème} siècle pour l'essentiel confiance à cette théorie.

⁵ [Lorentz 1899, p. 507]. Sur l'électromagnétisme et ses transformations de Maxwell à Lorentz, voir [Buchwald 1985] ; [Darrigol 1993] ; [Mc Cormmach 1970] ; [Whittaker 1951].

Le point de vue d'Einstein sur la théorie de l'électron de Lorentz

Einstein rend hommage à Lorentz d'avoir profondément simplifié la théorie de Maxwell et la représentation des échanges énergétiques entre lumière et matière. Par rapport aux difficultés de la théorie de Maxwell, Lorentz accomplit, selon l'expression d'Einstein, un véritable «acte libérateur»⁶. Et pourtant, Einstein reste insatisfait. Car son attente ultime, celle de fondements unifiés pour la physique, n'est pas comblée par l'électrodynamique de Lorentz. «Si l'on considère cette phase du développement de la théorie d'un œil critique, écrit-il des années plus tard, on est frappé par l'existence d'un dualisme lié au fait que le point matériel, au sens newtonien du terme, et le champ, considéré comme un continuum, sont tous les deux, et côte à côte, utilisés comme concepts élémentaires» [Einstein 1949, p. 32].

Grâce à sa théorie de l'électron, Lorentz parvient dans une certaine mesure à concilier les deux grandes théories de son temps (celle, essentiellement discontinue, de Newton, et celle, essentiellement continue, de Maxwell), au sens où il parvient à les faire fonctionner toutes deux ensemble de manière relativement harmonieuse. Mais le nouveau paradigme reste néanmoins foncièrement *dualiste* : il fait intervenir côte à côte une matière *discontinue* et un éther *continu*, lesquels apparaissent essentiellement distincts et antagonistes, tant au niveau de leur concept physique qu'à celui de leur représentation mathématique.

Einstein se rebelle contre l'idée que deux paradigmes fondamentaux de caractère aussi différents puissent être au fondement de la physique. C'est ce dont témoigne d'ailleurs l'introduction de l'article heuristique de 1905. «Il existe, y écrit Einstein, une profonde différence formelle entre les représentations théoriques que se sont forgées les physiciens à propos des gaz et des autres corps pondérables, et la théorie de Maxwell des processus électromagnétiques dans ce qu'il est convenu d'appeler l'espace vide. (...) Selon la théorie de Maxwell, l'énergie doit être conçue, pour tous les phénomènes purement électromagnétiques, et donc également pour la lumière, comme une fonction continue de l'espace, alors que l'énergie d'un corps pondérable doit, selon la conception actuelle des physiciens, être décrite comme une somme portant sur les atomes et les électrons. L'énergie d'un corps pondérable ne peut pas être divisée en parties aussi nombreuses et aussi petites que l'on veut, alors

⁶ [Einstein 1928, p. 223]. Pour plus de détails sur le contenu de cet 'acte libérateur', voir [Einstein 1949, pp. 31-32]. Pour un compte rendu très clair de l'évolution conceptuelle qui se produit de Maxwell à Lorentz, voir [Balibar 1992].

que l'énergie d'une radiation [*Strahl*] lumineuse émise par une source de lumière ponctuelle est, selon la théorie de Maxwell de la lumière (ou, selon toute théorie ondulatoire), distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant» [Einstein 1905a, trad. fr. p. 39].

Valeur des lignes argumentatives L1 et L1'

Les lignes argumentatives *L1* et *L1'* ne sont évidemment pas des démonstrations irréfutables. Elles ne sont même pas des arguments convaincants aux yeux de la communauté des physiciens. Tout d'abord, parce que les exigences thématiques einsteiniennes ne sont pas universelles. Ensuite, parce que même si elles l'étaient au niveau de leur énoncé général, c'est-à-dire même si tous les physiciens s'accordaient pour admettre qu'une théorie physique n'atteint le fond des choses qu'à la condition d'obéir aux deux exigences thématiques einsteiniennes, il resterait très difficile, pour ne pas dire impossible, d'énoncer des critères consensuels opérants permettant de décider si une théorie quelconque donnée atteint oui ou non le fond des choses (autrement dit si cette théorie doit être soit conservée et raffinée, soit remplacée au plus vite par une autre). La grande majorité des physiciens affirment ainsi par exemple viser la simplicité, mais peu d'entre eux s'accordent quant il s'agit de décider de ce qui est simple. Il en va de même avec les autres notions mises en jeu par les exigences thématiques einsteiniennes (unité, asymétries théoriques, contrepartie empirique, etc.).

Seconde ligne argumentative (*L2*) : l'utilisation conjointe de l'électromagnétisme de Lorentz et de la mécanique statistique conduit à des contradictions

La seconde ligne argumentative qui va être considérée est quant à elle une pièce de logique déductive irréprochable et une authentique démonstration physique. Le raisonnement correspondant est explicité par Einstein pour la première fois dans le volet critique de l'article heuristique de 1905. Diverses variantes en sont ensuite proposées par Einstein dans les cinq ou six années suivantes⁷.

⁷ Voir en particulier les pages indiquées des articles suivants : [Einstein 1906, pp. 75-77] ; [Einstein 1909a, p. 186] ; [Einstein 1911, pp. 409-410].

Le problème du corps noir vu par Einstein

Einstein s'intéresse au dit 'problème du corps noir', antérieurement étudié par Max Planck⁸. Il pose quant à lui le problème de la manière suivante. Soit une enceinte matérielle contenant d'une part un rayonnement composé de toutes les fréquences, d'autre part un gaz. Les parois de l'enceinte sont susceptibles d'absorber toutes les fréquences du rayonnement. Ceci, par l'intermédiaire d'entités matérielles oscillantes dont elles sont composées, appelées par Planck «résonateurs» : pour Einstein, ce sont par exemple des électrons liés oscillant autour de leur position d'équilibre. Le rôle des résonateurs est d'absorber et de réémettre le rayonnement, assurant ainsi les transferts d'énergie entre gaz et rayonnement. Au bout d'un moment, s'établit un équilibre gaz-résonateurs-rayonnement.

Le problème du corps noir est essentiellement le suivant : comment l'énergie se répartit-elle sur chaque fréquence du rayonnement lorsque la matière est portée à une température donnée, et comment la loi de distribution des fréquences évolue-t-elle en fonction de la température ? Einstein recherche cette loi, dite *loi du rayonnement du corps noir*, qui exprime la densité de rayonnement en fonction de la fréquence et de la température.

Il décompose pour ce faire la situation en deux équilibres partiels, l'un entre les molécules du gaz et les résonateurs constitutifs du corps noir, l'autre entre ces mêmes résonateurs et le rayonnement. Il recherche alors, pour chaque équilibre partiel, l'expression de l'énergie moyenne d'un résonateur. Pour l'équilibre gaz-résonateurs, c'est la *mécanique statistique* qui est en charge de fournir le résultat ; pour l'équilibre rayonnement-résonateurs, c'est *l'électromagnétisme de Lorentz*. Einstein obtient ainsi deux expressions distinctes de l'énergie moyenne d'un résonateur, l'une fournie par la mécanique statistique, l'autre par l'électromagnétisme de Lorentz.

Après avoir décomposé le problème complexe en deux sous-problèmes plus simples, il procède à la recomposition et dresse un bilan. Les deux expressions respectivement obtenues pour l'expression de l'énergie moyenne d'un résonateur de fréquence ν doivent évidemment être égales. L'égalisation des deux formules aboutit à une loi du rayonnement, plus tard connue sous le nom de 'loi de Rayleigh-Jeans' :

⁸ Pour une analyse d'ensemble des travaux correspondants de Planck, voir [Kuhn 1978] ; [Darrigol 1992, première partie].

$$\rho_\nu = k \frac{8\pi\nu^2}{c^3} T$$

où ρ_ν est la densité d'énergie du rayonnement de fréquence ν , T la température, c la vitesse de la lumière, et k la constante de Boltzmann.

L'analyse einsteinienne de la loi de Rayleigh-Jeans

Einstein commente – brièvement dans l'article heuristique, plus en détails au cours des années suivantes – le résultat obtenu.

- La formule considérée n'est tout d'abord pas conforme à l'expérience. En effet, les courbes expérimentalement obtenues sur le rayonnement noir montrent que la loi de Rayleigh-Jeans est seulement valable dans le domaine des basses fréquences et des hautes températures, mais ne vaut plus aux hautes fréquences.
- La loi de Rayleigh-Jeans est de plus intrinsèquement absurde : elle conduit en effet à attribuer aux hautes fréquences une énergie infinie à l'éther ou au rayonnement électromagnétique. Ce qui n'a non seulement aucun sens, mais qui de plus contredit la distribution énergétique d'équilibre prévue par l'électromagnétisme de Lorentz.

Conclusion de la partie critique de l'article : l'application conjointe au rayonnement noir de deux des plus grands paradigmes théoriques en vigueur en 1905 – mécanique statistique et électromagnétisme de Lorentz – débouche sur un résultat qui, aux hautes fréquences et aux basses températures, non seulement contredit par l'expérience, mais de plus est aberrant. C'est cette situation qu'Ehrenfest désignera, en 1911, par l'expression devenue célèbre de «catastrophe ultraviolette» [Ehrenfest 1911, p. 92].

Troisième ligne argumentative (L3) : l'absurde loi de Rayleigh/Jeans serait dissoute si l'éther était discontinu

Présentation de L3

Examinons à présent la troisième ligne argumentative. Le problème d'Einstein est celui de la conversion de l'énergie mécanique d'un système discontinu, en l'énergie électromagnétique d'un système continu – à savoir la

lumière, ou, ce qui revient au même, l'éther qui en est le siège. Le théorème de l'équipartition de l'énergie, très usité à l'époque, stipule que la matière transfère à chaque degré de liberté de l'éther une énergie proportionnelle à la température T . Comme l'éther est un milieu *continu*, il possède une nombre *infini* de degrés de liberté. Si l'éther est doté d'un nombre infini de degrés de liberté, et si chacun de ces degrés de liberté reçoit en partage une énergie proportionnelle à la température qui est un nombre positif, rien de surprenant à ce que l'on soit conduit à attribuer à l'éther une énergie infinie.

D'où le raisonnement probable d'Einstein : si l'éther était doté d'un nombre *fini* de degrés de liberté, l'équilibre rayonnement-matière deviendrait possible, et l'on échapperait à la conclusion aberrante à laquelle conduit la théorie de Lorentz. Ceci suggère l'idée d'un éther discontinu, et du même coup – l'éther étant le siège de l'énergie électromagnétique – celle d'une distribution spatiale discrète de l'énergie lumineuse.

Valeur et statut de L3

Le raisonnement qui sous-tend *L3* est en lui-même incontestable : toutes choses égales par ailleurs, on n'aurait effectivement plus à attribuer une énergie infinie à l'éther si ce dernier, du fait de sa structure discontinue, possédait un nombre *fini* de degrés de liberté. Ce raisonnement n'est par ailleurs pas explicité par Einstein. C'est une reconstitution de l'historien des sciences, lequel considère qu'il est plausible qu'Einstein ait raisonné de la sorte, consciemment ou non.

Qu'est-ce qui justifie cette interprétation de l'historien des sciences ? C'est qu'outre le fait qu'Einstein en vient effectivement à faire l'hypothèse d'un rayonnement discontinu, la nature même des difficultés mises en évidence par Einstein dans la partie critique de l'article heuristique – les données physiques du problème – suggèrent très fortement et tout naturellement que la contradiction provient de ce que l'on a affaire à un éther (ou à une énergie électromagnétique) continu.

Il est certes toujours risqué pour l'historien des sciences d'affirmer qu'un raisonnement ou qu'une conclusion est 'tout naturel', car il est bien connu que le sentiment de naturel n'est pas une donnée objective universelle, mais dépend largement d'habitudes de pensée devant être rapportées à un

contexte théorique précis⁹. Seulement, il se trouve que l'historien dispose dans le cas présent d'éléments pour étayer son point de vue.

Indépendamment d'Einstein et à peu près à la même époque, un autre physicien, Lord Rayleigh, obtient en effet (par une voie assez différente) la même loi absurde qu'Einstein dans la partie critique de l'article heuristique de 1905¹⁰. Discutant par publications interposées de son résultat avec l'un de ses collègues, James Jeans, Rayleigh commence par en souligner les conséquences absurdes : si la loi examinée «était applicable à toutes les longueurs d'onde, l'énergie totale du rayonnement serait, à une température donnée, infinie», commente-t-il dans la même veine qu'Einstein. C'est alors qu'il enchaîne sur cette remarque : «ceci est une conséquence inévitable de l'application de la loi d'équipartition à un milieu uniforme dépourvu de structure [i. e. continu]» [Rayleigh 1905, p. 55]. Un éther atomique, précise-t-il encore, dissoudrait en revanche le problème.

Rayleigh émet ces quelques propositions comme 'en passant'. Il n'y a là manifestement à ses yeux rien de plus qu'une pure virtualité conceptuelle, presque automatiquement suggérée par les données du problème considéré, mais n'ayant pas lieu d'être prise au sérieux *d'un point de vue physique*. Si Rayleigh prend néanmoins la peine de la formuler, c'est apparemment animé du scrupule de montrer à ses lecteurs que toutes les possibilités logiques ont bien été répertoriées. L'éventualité d'un éther atomique se voit de toutes façons éludée aussitôt après avoir été mentionnée, puisque c'est le théorème d'équipartition qui se trouve, à la suite du passage cité, rendu sans plus de développements ni de justifications responsable des contradictions rencontrées.

Il y a là à mes yeux un argument non négligeable en faveur de l'affirmation selon laquelle la ligne *L3* était en 1905, *en tant que possibilité conceptuelle*, naturelle pour un physicien confronté à l'expression de la loi de Rayleigh-Jeans.

⁹ Il en est de même pour un grand nombre de modalités intervenant dans les jugements des hommes de science à propos des théories scientifiques. Ainsi en va-t-il par exemple de la simplicité, de l'élégance, ou encore du 'pouvoir explicatif' conféré ou dénié à la théorie. Autour de ces questions et notamment des affirmations touchant au pouvoir explicatif, voir [Bitbol 1996, en particulier chapitre 1] ; [Soler 1997].

¹⁰ Sur cet aspect des travaux de Rayleigh, voir [Kuhn 1978, pp. 137-138 et chapitre 6] ; [Pais 1982, pp. 369-370].

Quatrième ligne argumentative (L4) : le paradigme moléculaire discret a remporté des succès si nombreux dans des domaines si divers qu'il est permis de placer en lui la plus grande confiance et les plus grands espoirs

La démonstration einsteinienne de la loi de Rayleigh-Jeans fait appel à la mécanique, plus précisément à un paradigme moléculaire discret. La quatrième ligne argumentative met en jeu *le point de vue d'Einstein sur un tel paradigme*. Expliciter vraiment le contenu de cette quatrième ligne argumentative, autrement dit présenter les résultats qui, aux yeux d'Einstein, jouent en faveur du modèle moléculaire, exigerait pour bien faire de rentrer dans le détail des travaux de jeunesse du physicien¹¹. Je me contenterai ici, faute de place de confronter les jugements respectivement portés en 1905 par la communauté scientifique et par Einstein sur le paradigme moléculaire.

Tous les physiciens du début du 20^{ème} siècle reconnaissent que la mécanique moléculaire, notamment la théorie cinétique des gaz élaborée par Boltzmann dans les deux dernières décennies du 19^{ème} siècle, a obtenu des succès certains. Néanmoins, *le statut* du modèle moléculaire reste très discuté : les atomes sont-ils un simple outil auxiliaire et commode du physicien, ou bien existent-ils vraiment dans la nature ? Le modèle moléculaire doit-il être plus amplement développé (comme le soutient Boltzmann), ou bien doit-il être abandonné (comme tendent à le penser des personnalités comme Ernst Mach ou les tenants de l'énergétisme) ? Sur de telles questions, la communauté des physiciens reste, au début du 20^{ème} siècle, profondément divisée¹².

Le jeune Einstein, lui, a par contre un point de vue bien déterminé : il croit non seulement à la fécondité du modèle moléculaire, mais aussi à la *réalité* moléculaire. Pour lui, les atomes ne sont pas une image : ils existent vraiment. Il écrit par exemple dans une lettre de septembre 1900, à propos de la théorie des gaz développée par Boltzmann : «Je suis fermement convaincu de la

¹¹ Voir [Klein 1967] ; [Klein 1974] ; [Klein 1979].

¹² Pour une vue d'ensemble sur les débats du 19^{ème} siècle relatifs à l'atomisme, voir [Pais 1982, chapitre 5] (Pais insiste en particulier sur le statut de l'hypothèse atomiste) ; [Nye 1972, chapitre 1] (Nye retrace l'histoire de l'hypothèse atomiste et de la question de la réalité moléculaire qui lui est associée, en faisant une place importante au mouvement brownien, et en replaçant les débats dans le contexte épistémologique de l'époque). Pour une perspective plus particulièrement centrée sur la théorie cinétique des gaz, voir le premier chapitre de [Brush 1976].

justesse des principes de la théorie, ce qui signifie que je suis convaincu que dans le cas des gaz, l'on a vraiment affaire à des masses ponctuelles discrètes de taille définie, qui se meuvent selon des lois déterminées» [Einstein 1987, pp. 260-261]. Tous les premiers travaux d'Einstein d'avant 1905 s'inscrivent dans le paradigme moléculaire et obtiennent dans ce cadre un certain nombre de succès.

Le point important pour la suite, c'est qu'Einstein, contrairement à bon nombre de ses contemporains, a toute confiance dans le paradigme atomiste discret. Cette confiance n'est encore une fois *pas* la conclusion obligée d'un raisonnement imparable. Elle s'ancre certes dans un certain nombre de résultats positifs incontestés, mais doit sans doute, plus fondamentalement, être rapportée à l'attachement du jeune Einstein au thème du discret.

Cinquième ligne argumentative (L5) : le théorème d'équipartition peut être démontré, dans le cadre d'un paradigme discret ayant par ailleurs fait ses preuves, sur des bases tellement générales qu'il faut admettre sa validité absolue

Le théorème d'équipartition

Outre le modèle moléculaire, il est un autre ingrédient de la mécanique statistique qui intervient de manière centrale dans la démonstration einsteinienne de la loi de Raiglegh-Jeans. Il s'agit d'un théorème tout à fait central de la mécanique moléculaire : le dit *théorème d'équipartition de l'énergie*, qui prescrit à chaque degré de liberté d'un système matériel une dotation équitable en énergie.

C'est en appliquant le théorème d'équipartition à l'équilibre résonateurs-molécules de gaz qu'Einstein obtient, dans la partie critique de l'article heuristique de 1905, l'expression de l'énergie moyenne d'un résonateur. Il est donc important de caractériser le point de vue d'Einstein sur ce théorème.

Valeur de la ligne L5

Justifier une telle caractérisation exigerait une assez longue immersion dans les travaux d'Einstein d'avant 1905 sur les fondements de la thermodynamique¹³. Je m'en tiendrai ici, faute de place, à une rapide

¹³ Voir les références proposées à la note 12.

présentation, et ne pourrai donc examiner en profondeur la question de la valeur de la ligne argumentative *L5*, le lecteur ne disposant pas des éléments nécessaires pour évaluer la plausibilité du compte rendu proposé. Je me limiterai sur ce point à une remarque très générale : si l'on accepte les prémisses essentielles du modèle einsteinien qui sert de cadre à la démonstration du théorème d'équipartition, alors ce théorème est bien comme le pense Einstein établi ; la démonstration correspondante est en effet une démonstration physique digne de ce nom.

Confrontation des points de vue respectifs de la communauté des physiciens et d'Einstein sur le théorème d'équipartition en 1905

Autour de 1905, le théorème d'équipartition est très controversé. Il conduit en effet à certaines prédictions non conformes aux valeurs expérimentales, ayant notamment trait aux chaleurs spécifiques des corps et aux spectres d'émission des atomes¹⁴. De telles difficultés ont même été et sont encore en 1905 considérées par d'éminents physiciens comme un obstacle majeur à l'acceptabilité de la théorie atomique.

Einstein, lui, a en 1905 un point de vue original sur le théorème d'équipartition. Ceci, depuis 1902, date à laquelle il a proposé de ce théorème une démonstration extrêmement générale, conduite dans le cadre du paradigme moléculaire discret [Einstein 1902].

De 1902 à 1905, Einstein tente, dans ses travaux¹⁵, de mettre en rapport deux niveaux de description physique : celui, macroscopique, de la thermodynamique dite 'phénoménologique', et celui, microscopique, de la mécanique statistique. Il s'emploie à développer une mécanique statistique tout à fait générale ne faisant appel qu'à quelques hypothèses simples sur la réalité atomique : nombre fini de degrés de liberté des systèmes physiques, équations différentielles linéaires du premier ordre pour la variation temporelle des états, etc. Il parvient alors, à partir des propriétés postulées de ce modèle discret sous-jacent et très général, à déduire certaines caractéristiques observables du niveau supérieur décrit par la thermodynamique, telles les expressions de la température et de l'entropie.

C'est dans un tel cadre que se situe la démonstration du théorème d'équipartition. Einstein, fort de sa confiance dans le paradigme discret (*L5* croise ici *L4* et y est à certains égards subordonnée) et dans la mécanique

¹⁴ Voir par exemple [Brush 1967].

¹⁵ Voir notamment [Einstein 1903] ; [Einstein 1904].

statistique très générale par lui développée, juge sa démonstration irréprochable. Le théorème d'équipartition lui apparaît dans ces conditions comme une vérité bien établie.

Sixième ligne argumentative (L6) : l'homologie des formules exprimant la dépendance volumique de l'entropie du gaz parfait et du rayonnement, indice d'une similitude entre les systèmes physiques correspondants

Structure d'ensemble de la sixième ligne argumentative

La sixième ligne argumentative s'appuie sur une analogie formelle pour conclure que gaz et rayonnement présentent tous deux une structure énergétique discrète. Il ne s'agit cette fois pas d'une authentique démonstration, l'analogie n'étant pas un raisonnement logiquement valide. L'argument est ici d'autant moins crédible qu'il aboutit à une conclusion parfaitement aberrante du point de vue des connaissances physiques de l'époque (Einstein lui-même qualifie comme c'est bien connu de «révolutionnaire» [Einstein 1905c] l'hypothèse des quanta de lumière).

Cette sixième ligne argumentative est explicitée dans la partie de l'article heuristique que j'ai qualifiée de 'constructive'. Elle est la solution que propose Einstein pour résoudre le dilemme mis en évidence dans la partie critique. Au cours des développements critiques, Einstein soulignait que la loi de Rayleigh-Jeans, conséquence de l'électromagnétisme et de la mécanique en vigueur, n'est valable qu'aux basses fréquences et aux hautes températures. Dans la phase constructive, il focalise son attention sur le domaine dans lequel faillit l'électromagnétisme, celui des hautes fréquences et des basses températures.

La structure globale de l'argument est la suivante. A l'intérieur du domaine restreint considéré, Einstein recherche l'expression de la dépendance en volume d'une grandeur thermodynamique centrale, l'entropie. Ceci, d'une part pour un gaz parfait, d'autre part pour un rayonnement monochromatique. Or, les deux expressions mathématiques obtenues sont homologues. Einstein en conclut que la lumière est l'analogue du gaz, et propose en conséquence de considérer que l'énergie lumineuse est, comme celle du gaz, distribuée de manière discrète dans l'espace.

Examinons à présent d'un peu plus près les étapes de l'argument.

Dépendance volumique de l'entropie d'un rayonnement monochromatique de faible densité

Einstein calcule la variation d'entropie $S - S_0$ qui résulte lorsqu'un rayonnement initialement compris dans un volume V_0 se retrouve tout à coup concentré dans un sous-volume V :

où E est l'énergie moyenne du rayonnement de fréquence, k la constante de Boltzmann, et h la constante de Planck.

La démonstration fait intervenir :

- l'hypothèse que la distribution de l'énergie sur les différentes fréquences est régie par une loi déterminée, alors appelée loi du rayonnement de Wien. La communauté des physiciens s'accordait à l'époque alors, sur la base des résultats expérimentaux disponibles, pour admettre cette loi dans le domaine des hautes fréquences et des basses températures auquel se restreint Einstein.
- des considérations de thermodynamique macroscopique, théorie alors estimée tout à fait assurée et exempte d'hypothèses suspectes (pour de nombreux physiciens, la thermodynamique ne fait que traduire 'ce que nous dit l'expérience').

Le résultat obtenu par Einstein est donc lui-même au dessus de tous soupçons, tant aux yeux de son auteur qu'à ceux du reste de la communauté des physiciens de l'époque.

Dépendance volumique de l'entropie d'un gaz parfait ou d'une solution diluée

Une fois réglé le cas du rayonnement, Einstein entend se pencher sur celui du gaz, plus précisément déterminer l'expression de la variation de l'entropie $S - S_0$ qui résulte quand les n molécules indépendantes d'un gaz parfait, tout d'abord contenues dans le volume V_0 , se trouvent tout à coup ramenées à une portion V de V_0 .

La démonstration d'Einstein est cette fois tout à fait originale. Elle part d'une équation introduite par Boltzmann, d'ailleurs baptisée «principe de Boltzmann» :

$$S - S_0 = k \ln W$$

où W désigne la probabilité relative de l'état S par rapport à l'état S_0 . Cette probabilité a ici pour expression (tous les points de l'enceinte étant équivalents) :

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

On obtient donc pour la variation d'entropie recherchée :

$$S - S_0 = k \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

Einstein retrouve ainsi, selon un cheminement qui lui est propre, la formule à l'époque bien connue de la dépendance volumique de l'entropie d'un gaz parfait, d'ordinaire obtenue à partir de considérations de thermodynamique macroscopique.

Homologie des deux formules de probabilité respectivement obtenues pour le gaz et pour le rayonnement

L'expression de la variation volumique de l'entropie du *rayonnement* peut, si l'on souhaite souligner la similitude avec la formule obtenue *pour le gaz*, être réécrite de la manière suivante :

$$S - S_0 = k \ln \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{E}{h\nu}} \right]$$

Par ailleurs, le principe de Boltzmann, $S - S_0 = k \ln W$, est supposé par Einstein être extrêmement général et valoir tant pour le gaz que pour le rayonnement. Le rapport des volumes qui, dans la formule du rayonnement, intervient comme argument du logarithme, peut donc être identifié à une probabilité : la probabilité pour qu'à un instant quelconque, toute l'énergie du rayonnement de fréquence ν et d'énergie E passe du volume V_0 au volume V .

La conception einsteinienne de la probabilité

Un bref détour du côté de la conception einsteinienne de la probabilité en général est en ce point nécessaire, si l'on souhaite saisir pleinement ce qui confère sa force à la ligne *L6* aux yeux de son auteur.

Le concept de probabilité et l'interprétation que lui associe Einstein jouent un très grand rôle dans presque tous les travaux du physicien. Sans pouvoir développer, j'insisterai sur le fait que depuis 1903 (et jusqu'à la fin), Einstein revendique une conception *statistique* de la probabilité, c'est-à-dire une conception dans laquelle la probabilité d'un état est identifiée à la fréquence temporelle d'apparition de cet état¹⁶. Pour Einstein, la probabilité est donc une authentique grandeur physique, une grandeur corrélée à l'histoire effective des microsystèmes physiques.

C'est là une originalité de la position d'Einstein par rapport à celle d'autres physiciens de l'époque, notamment par rapport à celle de Planck. Planck ne considère pas le W qui intervient dans la formule de Boltzmann comme une grandeur physique digne de ce nom, mais bien plutôt comme une sorte de moyen mathématique de calculer, par des techniques combinatoires plus ou moins *ad hoc* et très peu articulées aux caractéristiques des modèles microscopiques sous-jacents, les grandeurs macroscopiques relatives aux systèmes physiques, par exemple l'entropie ou l'énergie.

L'analogie formelle suggère l'hypothèse d'une structure quantifiée du rayonnement

Revenons aux deux expressions analogues de la probabilité. Comme la probabilité est aux yeux d'Einstein une grandeur *physique*, son expression mathématique doit être *physiquement interprétée*. C'est là qu'entrent en scène les quanta de lumière, selon un raisonnement du genre suivant.

On a deux formules analogues pour la probabilité, l'une valable pour le gaz, l'autre pour le rayonnement. Toutes deux se présentent comme le rapport des deux volumes successivement occupés par le système physique considéré. Toutes deux sont élevées à une certaine puissance, laquelle est un quotient sans dimension.

Dans le cas du gaz, l'exposant en question correspond au nombre de molécules indépendantes présentes dans l'enceinte. Il est dans ces conditions tentant d'étendre cette interprétation au rayonnement électromagnétique : l'exposant sans dimension $\frac{E}{h\nu}$ qui intervient dans la formule de l'entropie du rayonnement est alors vu comme un 'nombre de quelque chose' se rapportant

¹⁶ Pour les déclarations originales correspondantes, voir notamment : [Einstein 1903, trad. fr. p. 19] ; [Einstein 1905a, trad. fr. p. 46] ; [Einstein 1909a, pp. 187-188] ; [Einstein 1910, pp. 1276-1278] ; [Einstein 1911, pp. 436-446] .

au rayonnement. Un nombre *de quoi* ? La quantité $h\nu$ est – l'analyse dimensionnelle le montre – une quantité d'énergie. Le nombre de 'quelque chose' auquel s'identifie l'exposant E/h est donc un nombre de quantités d'énergie h . Ces quantités, Einstein les baptise *quanta de lumière*.

Il conclut en effet : un rayonnement monochromatique de faible intensité (dans les limites de validité de la loi de Wien) se comporte (...) comme s'il était constitué de quanta d'énergie, indépendants les uns des autres, de grandeur $[h\nu]$ [Einstein 1905a, trad. fr. p. 48].

Quelles caractéristiques du gaz parfait Einstein transfère-t-il en définitive au rayonnement ? Tout d'abord la structure énergétique discrète, soit l'introduction d'un nombre fini de constituants énergétiques. Certaines propriétés des molécules de gaz sont ensuite transférées aux constituants du rayonnement que sont les quanta de lumière. Les parties d'énergie rayonnante sont *indépendantes et localisées* ; elles ont la faculté de se *mouvoir* ; enfin, une quantité (d'énergie et non plus de matière) *déterminée et indivisible* leur correspond¹⁷.

Valeur de l'argument analogique

Malgré les précautions verbales (le rayonnement «se comporte (...) comme» un gaz parfait), la conclusion d'Einstein est fort osée. Ce, à plusieurs titres.

D'abord parce qu'elle remet en question un modèle ayant jusqu'alors largement fait ses preuves. La conception ondulatoire du rayonnement est en effet, répétons-le, unanimement admise en 1905. Elle seule semble capable de rendre compte d'un très grand nombre de faits expérimentaux, en particulier des phénomènes d'interférence. Einstein traite gaz et rayonnement comme des analogues, alors qu'ils apparaissent aux yeux de tous les physiciens d'alors comme des systèmes fondamentalement antagonistes, le premier relevant du continu, le second du discontinu.

¹⁷ L'article heuristique explicite ces diverses caractéristiques. L'introduction mentionne « un nombre fini de quanta [*Lichtquant*] localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que tout d'un bloc » [Einstein 1905a, trad. fr. p. 40] (nombre fini, localisation, mouvement, indivisibilité), tandis la conclusion fait état de « quanta d'énergie, indépendants les uns des autres, de grandeur $[bh]$ » (*Ibid.*, p. 48) (indépendance, extension énergétique déterminée).

Ensuite, parce qu'elle se fonde sur des arguments fort peu solides. L'hypothèse des quanta de lumière repose uniquement sur une *analogie formelle*, et le raisonnement par analogie, s'il est parfois extrêmement fécond pour la suggestion de nouvelles idées, ne constitue pas en lui-même, tout le monde en convient, une *justification logique* de ces idées.

Enfin, parce que l'analogie considérée reste tout de même assez pauvre : elle s'appuie en effet sur une formule mathématique (celle de la dépendance volumique de l'entropie) certes très générale mais néanmoins *unique*.

En dépit de tout cela, l'analogie formelle apparaît à Einstein hautement significative. On peut postuler que l'un des éléments de la conviction einsteinienne – que je signale ici en passant et sur lequel je ne reviendrai pas par la suite, en raison de son caractère relativement périphérique par rapport au réseau de contraintes proposé – est le suivant.

Les deux formules homologues mises en jeu dans l'analogie formelle peuvent toutes deux être obtenues à partir de considérations de thermodynamique macroscopique – dans l'article heuristique, celle qui se rapporte au gaz est dérivée au moyen d'un argument original faisant appel au principe de Boltzmann, mais la démonstration thermodynamique de cette formule était en 1905 bien connue.

Or, la thermodynamique macroscopique était à l'époque, assez unanimement, jugée extrêmement fiable – et Einstein se rallie de ce point de vue à l'avis général –, étant dans une large mesure assimilée à une simple *description* des relations qui corrélaient les grandeurs macroscopiques directement mesurables, à une traduction immédiate et donc assurée des phénomènes empiriques, représentation exempte de toute hypothèse métaphysique indésirable. Et il se trouve que cette description si assurée, loin d'indiquer la moindre opposition entre gaz et rayonnement, caractérise au contraire ces deux systèmes au moyen d'équations tout à fait semblables : elle n'introduit quant à elle, contrairement à la théorie de Lorentz basée sur l'utilisation conjointe de la mécanique et de l'électromagnétisme, aucun dualisme en physique. Du coup, le dualisme continu/discontinu caractéristique de la théorie de Lorentz peut être vu *comme un cas particulier d'asymétrie théorique dépourvue de corrélat observationnel* (la thermodynamique étant assimilée à une sorte de résumé d'observations, l'électromagnétisme de Lorentz à une théorie toujours récusable visant à rendre compte des observations disponibles).

Résultat : le dualisme continu/discontinu étant pensé comme ayant été *artificiellement* créé par la théorie de l'électron (les données empiriques ne montrant rien de tel), l'impératif thématique einsteinien d'éliminer ce dualisme apparaît conforté par une raison qui, parce qu'elle est conçue comme *empirique*, est estimée valable, voire inéluctable – en tout cas beaucoup plus recevable qu'une simple contrainte thématique subjective quant à elle injustifiable. Et comme le même dualisme continu/discontinu est dissout par l'hypothèse des quanta de lumière à laquelle incite très fortement la grande similitude des formules thermodynamiques, Einstein est enclin à faire confiance à l'argument analogique qui conduit à une telle hypothèse.

Bien entendu, le raisonnement précédent – qui incidemment permet de mettre en évidence un lien possible entre les deux exigences thématiques einsteiniennes – ne vaut qu'à condition d'admettre que la thermodynamique est une description immédiate de l'ordre empirique, affirmation évidemment hautement discutable, la frontière entre le domaine de la théorie et celui de l'observation restant toujours très délicate à tracer.

Septième ligne argumentative (L7) : l'hypothèse des quanta de lumière permet de rendre très simplement compte de situations d'interaction rayonnement-matière fort difficiles à interpréter dans le cadre du modèle ondulatoire en vigueur

Présentation générale de L7

La septième ligne argumentative vise à montrer la fécondité *empirique* de l'hypothèse des quanta de lumière. Elle est présentée dans la partie constructive de l'article heuristique, à la suite du développement de l'analogie formelle entre gaz et rayonnement. Jusqu'alors, l'hypothèse d'une structure énergétique discrète se rapporte uniquement au rayonnement libre dans l'espace (indépendamment de toute interaction avec la matière). A présent, Einstein s'emploie à faire opérer l'hypothèse révolutionnaire dans le cas de situations expérimentales connues d'interaction rayonnement-matière (émission, absorption et/ou de transformation de la lumière par la matière).

Einstein applique le modèle des quanta de lumière à trois types de phénomènes :

- La photoluminescence : quand on éclaire un matériau avec de la lumière monochromatique, une lumière de couleur différente est réémise.
- L'effet photoélectrique : l'irradiation d'un métal par de la lumière ultraviolette provoque l'extraction d'électrons de ce métal.
- L'ionisation des gaz par la lumière ultraviolette.

Chaque fois, Einstein propose, à partir de l'hypothèse de la structure quantifiée de l'énergie du rayonnement, une représentation *très simple* des processus considérés (du genre : un quantum de lumière communique son énergie à un électron qui est alors éjecté du métal ; un quantum de lumière transfère son énergie à une molécule de gaz et l'ionise...). Chaque fois, il montre que l'hypothèse n'est *pas en contradiction* avec les caractéristiques expérimentales jusqu'alors connues des phénomènes en question. Chaque fois, il déduit de l'hypothèse des quanta de lumière un certain nombre de *conséquences en principe testables expérimentalement*, de relations qualitatives ou quantitatives, ces prédictions constituant autant de mises à l'épreuve potentielles pour l'hypothèse des quanta de lumière.

Dans les années suivantes, Einstein appliquera l'hypothèse des quanta de lumière à d'autres phénomènes, notamment aux rayons X¹⁸.

Statut et valeur de la septième ligne argumentative

L7 n'est pas une démonstration irrécusable.

Tout d'abord, parce l'affirmation selon laquelle l'hypothèse des quanta de lumière, contrairement à la théorie électromagnétique, permet (contrairement à la théorie de Lorentz) de rendre *très simplement et très naturellement* compte d'un certain nombre de phénomènes spécifiés, repose sur des jugements de valeurs. Il n'existe en effet aucun moyen universel de décider qu'une explication *A* est plus simple ou plus naturelle qu'une explication *B*. Tous les physiciens s'accordent certes pour préférer la simplicité, le naturel, l'élégance, etc. Mais il est bien connu que d'importantes divergences sont susceptibles de se manifester lorsqu'il s'agit de déterminer ce qui est simple, naturel, élégant, etc. Les critères qui président à de tels jugements de valeur peuvent considérablement varier d'un individu à l'autre.

¹⁸ Voir notamment [Einstein 1909b].

Ensuite, parce que le jugement qu'exprime *L7*, comme tout jugement reposant sur les potentialités de deux paradigmes rivaux, est entâché de précarité, étant à tout instant susceptible d'être renversé. Comment, en l'occurrence, être sûr d'avoir épuisé toutes les possibilités offertes par le paradigme ondulatoire continu ? Qu'est-ce qui garantit qu'un tel paradigme ne fournira pas demain un compte rendu plus satisfaisant que celui que permet aujourd'hui l'hypothèse heuristique ? La septième ligne argumentative, même pour ceux qui en 1905 l'admettent avec Einstein, ne vaut néanmoins qu'ancrée en un point spécifié du temps, lui-même référé à un état déterminé de développement des deux paradigmes discret et ondulatoire concurrents.

Ceci étant dit, la très grande majorité des physiciens auraient très probablement souscrit en 1905 à l'énoncé de *L7*. Et pourtant, aucun de ceux qui lurent l'article heuristique autour de cette période ne considéra *L7* comme un argument déterminant (puisqu'aucun ne prit à partir de là au sérieux l'hypothèse des quanta de lumière). C'est que la *qualité de l'explication* (simplicité, naturel, etc.) n'est évidemment pas le seul type de facteur à peser dans la balance. Le *nombre* de phénomènes susceptibles d'être subsumés sous le même schème explicatif joue également un rôle crucial. Or le modèle des quanta, s'il convainc appliqué de manière sélective à l'effet photoélectrique, à la photoluminescence et à l'ionisation des gaz, semble corrélativement inapte à rendre compte d'un grand nombre d'*autres* faits empiriques (les interférences notamment), tâche dont la théorie électromagnétique s'acquitte quant à elle parfaitement. Et comme il n'existe aucune procédure universelle qui permette d'évaluer le poids respectif des facteurs qualitatifs et quantitatifs, le point de vue finalement adopté par Einstein – l'affirmation de la supériorité du paradigme discret par rapport au modèle ondulatoire continu – relève donc plus de l'appréciation personnelle que de la nécessité logique traditionnellement associée à la démonstration au sens fort du terme.

Huitième ligne argumentative (*L8*) : concilier quanta de lumière discontinus et ondes continues.

La huitième ligne argumentative propose un schème de raccordement entre les deux modèles au premier abord antagonistes que sont les quanta de lumière discontinus et les ondes électromagnétiques continues. Ceci, afin que l'hypothèse des quanta de lumière n'oblige pas à renoncer aux très nombreux succès remportés par l'électromagnétisme.

C'est dans l'introduction de l'article heuristique qu'Einstein indique la voie dans laquelle le dilemme continu/discontinu peut être résolu : «La théorie ondulatoire de la lumière opérant avec des fonctions d'espace continues s'est avérée parfaite pour ce qui est de la description des phénomènes purement optiques et il se peut qu'elle ne soit jamais remplacée par une autre théorie. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les observations optiques portent sur des valeurs moyennes dans le temps, et pas sur des valeurs instantanées. Il n'est pas inconcevable, bien que les théories de la diffraction, de la réflexion, de la réfraction, de la dispersion, etc., soient entièrement confirmées par l'expérience, que la théorie de la lumière qui opère sur des fonctions continues de l'espace puisse conduire à des contradictions avec l'expérience lorsqu'elle est appliquée aux phénomènes de production et de transformation de la lumière» [Einstein 1905a, p. 40].

Einstein distingue deux niveaux de description, et associe chacun à une échelle temporelle différente : le niveau supérieur a trait aux comportements *moyens* ; le niveau inférieur, aux comportements *instantanés*. Entre les deux niveaux, est conçu un lien *d'approximation à approximé* : les énoncés du niveau phénoménologique sont supposés offrir une description grossière de ce qui a lieu au niveau profond.

Le rayonnement est donc *en fait*, à échelle microscopique, constitué de paquets indivisibles d'énergie. La représentation ondulatoire continue offre, à échelle macroscopique, une *approximation adéquate* de cette structure discrète, dès lors que l'on étudie les phénomènes électromagnétiques sur des durées suffisamment longues. D'où les succès jusque-là incontestés remportés par la théorie de Maxwell en ce qui concerne le traitement des phénomènes optiques mettant en jeu des valeurs *moyennes*. D'où les difficultés de cette même théorie quand il s'agit de rendre compte des phénomènes *instantanés* de production et de transformation de la lumière.

La huitième ligne argumentative n'est évidemment pas une preuve au sens fort du terme. Einstein ne démontre pas l'existence d'un lien d'approximation à approximé entre ondes et quanta lumineux. Il met seulement en avant un schème possible de raccordement, une manière possible de concilier continu et discontinu.

Les quanta de lumière, point de convergence d'un réseau argumentatif complexe

Statut du présent compte rendu

Il n'est pas dans mon intention de *réduire* le geste einsteinien au réseau des huit lignes argumentatives proposées. Le présent compte rendu n'est soutenu par aucune thèse déterministe ou pan-rationaliste relative à la logique de la découverte scientifique¹⁹, et ne prétend d'ailleurs même pas à l'exhaustivité : les prémisses décrites ne sont supposées ni impliquer logiquement l'idée des quanta de lumière, ni démontrer la rationalité (en un sens très large du terme) de toute élaboration scientifique, ni enfin épuiser les motifs de la conviction einsteinienne selon laquelle l'idée des quanta (une fois émise) doit être prise au sérieux. Le réseau argumentatif en question n'est donc pas conçu comme un algorithme qui, connu d'avance par quelque démon de Laplace nouvelle version, aurait permis de prévoir avec certitude les conceptions et les prises de position atypiques d'Einstein à propos de la lumière. Il est bien plutôt vu comme une reconstitution après coup dont l'acceptabilité doit être jaugée à l'aune de sa capacité à intégrer au sein d'un récit cohérent et plausible le maximum de faits historiques pertinents par rapport à l'objet d'étude, et dont la valeur doit être mesurée à l'intelligibilité nouvelle qui en résulte éventuellement.

Ceci étant précisé, il s'agit d'opérer une synthèse en vue de rendre compte de l'hypothèse des quanta de lumière. Autrement dit, de montrer comment les huit lignes argumentatives jusqu'ici séparément présentées s'enchevêtrent et interagissent jusqu'à converger vers l'idée d'une structure discrète de l'énergie lumineuse.

Pourquoi accuser l'électromagnétisme en vigueur plutôt que la mécanique statistique ?

Prenons *L2* comme point de départ : l'utilisation conjointe de l'électromagnétisme de Lorentz et de la mécanique statistique conduit à une loi du rayonnement absurde. Il s'agit, je le répète, de la conclusion d'une

¹⁹ Autour de ce genre de questions, voir [Hanson 1961], et la présentation de la problématique générale d'une logique de la découverte scientifique par P. Jacob [Jacob 1980, pp. 403-404] ; [Nickles 1980] ; [Zahar 1983]. Pour une réflexion sur le sujet qui, à titre d'exemple, prend appui sur les travaux d'Einstein consacrés à la relativité restreinte, voir [Paty 1996].

authentique démonstration. Tout physicien en ayant eu connaissance ne pouvait donc, après vérification, que l'accepter. C'est d'ailleurs ce qui, de fait, se produisit : la démonstration d'Einstein – et d'autres raisonnements du même type – finirent dans les années qui suivirent 1905 par persuader la grande majorité des membres de la communauté scientifique que 'quelque chose n'allait pas' dans les théories en vigueur²⁰.

Mais *quoi* ? A s'en tenir à la seule logique, l'un au moins des éléments théoriques utilisés dans la démonstration d'Einstein doit être remis en question. Seulement, la logique ne désigne pas lequel. On a là une illustration de la thèse du holisme épistémologique introduite par Duhem et radicalisée par Quine²¹. L'alternative est schématiquement la suivante : des modifications théoriques doivent être introduites, *soit* au niveau de l'électromagnétisme de Lorentz, *soit* au niveau de la mécanique statistique.

Placé devant un tel dilemme en 1905, pratiquement n'importe quel physicien aurait sans hésiter incriminé la mécanique statistique, très discutée à l'époque, plutôt que l'électromagnétisme. Or, Einstein opte, lui, pour l'autre solution. Il n'explicite d'ailleurs même pas l'alternative dans l'article heuristique : sans ébaucher la moindre discussion, il accuse d'emblée l'électromagnétisme de Lorentz, et propose de lui faire subir des transformations révolutionnaires, en introduisant l'hypothèse des quanta de lumière.

²⁰ Voir par exemple [Solvay 1911].

²¹ Dans les termes de Duhem : « le physicien ne peut jamais soumettre au contrôle de l'expérience une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble d'hypothèses ; lorsque l'expérience est en désaccord avec ses prévisions, elle lui apprend que l'une au moins des hypothèses qui constituent cet ensemble est inacceptable et doit être modifiée ; mais elle ne lui désigne pas celle qui doit être changée » [Duhem 1906, p. 284]. Ou, dans les termes de Quine : « Nos énoncés sur le monde extérieur sont jugés par le tribunal de l'expérience sensible, non pas individuellement, mais seulement collectivement » [Quine 1951, p. 107]. Duhem s'en tenait aux énoncés *physiques*. Quine étend la thèse à *n'importe quel énoncé* intervenant d'une manière ou d'une autre dans nos jugements à propos du monde extérieur (les énoncés de la logique ne font en particulier pas exception).

En bref : soit une série d'énoncés quelconques ; si, pris tous ensembles, ces énoncés conduisent à des contradictions ou soulèvent des problèmes d'ordre divers, le physicien n'est jamais absolument contraint de mettre en œuvre telle ou telle solution. Différents remaniements sont en général logiquement possibles, entre lesquels il reste libre de choisir.

Comment expliquer cette attitude atypique ? Pour ce faire, peuvent être convoquées les lignes argumentatives *L1*, *L1'*, *L4* et *L5*.

- En vertu de *L4*, le paradigme moléculaire discret et la mécanique statistique en général sont dignes de la plus haute confiance.
- En vertu de *L4* et de *L5*, le théorème d'équipartition, pourtant très controversé à l'époque, est aux yeux d'Einstein à l'abri de tous soupçons, ayant été démontré pour des situations extrêmement générales. Il est donc hors de question de le rendre responsable de l'absurde loi de Rayleigh-Jeans.

C'est pourtant pour cet échappatoire qu'auraient en priorité opté la grande majorité des physiciens de l'époque. Quand Rayleigh discute quelques mois plus tard avec Jeans des conséquences aberrantes de la dite loi de Rayleigh-Jeans, c'est bien le théorème d'équipartition qu'il choisit pour sa part de mettre en cause (comme on l'a vu plus haut). Et dans les années suivantes, divers nouveaux arguments d'Einstein en faveur des quanta de lumière sont attaqués sur la base du fait qu'ils utilisent le théorème d'équipartition.

L4 et *L5* fonctionnent déjà aux yeux d'Einstein comme des arguments pour ne pas incriminer la partie 'mécanique statistique' de sa démonstration. Mais ce n'est pas tout. Einstein estime par ailleurs avoir de bonnes raisons de remettre en cause *l'autre théorie* qui sous-tend la démonstration de la loi de Rayleigh-Jeans, à savoir l'électromagnétisme.

- Car en vertu de *L1*, les théories caractérisées par un dualisme des fondements et par des asymétries théoriques n'ayant pas de corrélat observationnel doivent être bannies. Conséquence (c'est la ligne *L1'*) : l'électromagnétisme en vigueur, dont les axiomes font intervenir côte à côte, en tant que concepts de base irréductibles, des ondes continues et des corpuscules discrets, exige de profonds remaniements.

Les ingrédients de la mécanique statistique utilisés étant dignes de la plus haute confiance, l'électromagnétisme en vigueur étant, elle, fondamentalement insatisfaisante, c'est cette dernière qu'Einstein rend responsable des contradictions obtenues dans la partie critique de l'article heuristique.

Pourquoi, dans l'électromagnétisme, remettre en question le modèle ondulatoire continu ?

Cette position, considérée en elle-même, est déjà profondément originale. Mais Einstein va beaucoup plus loin encore. Il ne se contente pas d'accuser l'électromagnétisme. Il précise en outre le chef d'accusation. Et ce qu'il remet en cause, c'est justement ce qui de la théorie électromagnétique d'alors semble le plus incontestable : le modèle ondulatoire continu, en 1905 unanimement considéré comme un acquis définitif, ayant dans la dernière décennie du 19^{ème} siècle complètement triomphé de son rival, le paradigme discret d'inspiration newtonienne dans lequel la lumière est décrite comme un flux de petits corpuscules matériels²².

Qu'est-ce donc qui conduit malgré tout Einstein à accorder crédit à l'hypothèse des quanta de lumière, hypothèse qu'il qualifie pourtant lui-même de «révolutionnaire» en 1905, et même, plus tard en 1909, de «monstrueuse» [Einstein 1909b, p. 96] ? La considération des lignes *L3*, *L6*, *L7*, *L8*, *L1*, *L1'* et *L4* permet d'éclairer cette question.

- En vertu de *L3*, la loi de Rayleigh-Jeans découle de deux prémisses : le théorème d'équipartition, qui prescrit d'attribuer à chaque degré de liberté de l'éther une énergie proportionnelle à la température ; le caractère continu de l'éther, qui impose un nombre infini de degrés de liberté. Il y a donc deux manières possibles d'emblée assez évidentes d'échapper à la loi de Rayleigh-Jeans et à ses conséquences absurdes : soit remettre en cause le théorème d'équipartition (mais Einstein s'y refuse en vertu de *L5*) ; soit doter l'éther d'un nombre fini de degrés de liberté. Cette dernière possibilité suggère l'idée d'une énergie électromagnétique concentrée en certains points plutôt qu'uniformément répartie dans l'espace.
- En vertu de *L6*, l'expression de la dépendance volumique de l'entropie d'un rayonnement monochromatique incite, par analogie avec le gaz, à doter le rayonnement d'une structure interne. Le déploiement de l'analogie gaz-rayonnement permet en outre de préciser l'expression de la quantité minimale d'énergie lumineuse ($h\nu$). L'hypothèse d'une

²² Pour une analyse détaillée de la conception newtonienne corpusculaire de la lumière, voir [Blay 1983].

répartition discontinue de l'énergie électromagnétique gagne ainsi en plausibilité.

- En vertu de *L7*, les données expérimentales relatives à un certain nombre de situations d'interaction matière-lumière sont fort difficiles à interpréter dans le modèle ondulatoire. L'hypothèse d'une structure discrète de l'énergie électromagnétique permet en revanche, non seulement d'obtenir une image simple des phénomènes considérés, mais de plus des prédictions qualitatives et quantitatives corroborées en l'état des connaissances. C'est une raison supplémentaire pour prendre au sérieux l'hypothèse des quanta de lumière.
- En vertu de *L8*, l'hypothèse des quanta de lumière n'est de surcroît en principe pas irréconciliable avec les très nombreux succès jusqu'alors obtenus par la théorie ondulatoire : un schème de raccordement peut en effet être proposé, qui associe chacun des deux modèles à une échelle de description distincte, et rend ainsi moins inacceptable l'hypothèse des quanta de lumière.

Outre ces quatre arguments *physiques*, d'autres arguments, *thématiques* cette fois, confortent encore aux yeux d'Einstein l'hypothèse des quanta de lumière.

- Rappelons qu'en vertu de *L1'* (et en conséquence de *L1*), doit être résorbé l'insupportable dualisme continu/discontinu qui caractérise l'électromagnétisme de Lorentz. Il y a au premier abord deux manières d'atteindre cet objectif : tout réduire au continu, ou tout ramener au discontinu.
- Or en vertu de *L4*, Einstein est plutôt porté vers la seconde de ces deux solutions. Il accorde en effet toute sa confiance au paradigme moléculaire discret, et le pense en conséquence plus apte à être le vecteur de la grande unification souhaitée.

Conclusion : multiplicité et enchevêtrement des déterminants de l'invention scientifique

Récapitulons. Une première constellation de lignes argumentatives converge vers la conclusion que l'hypothèse des quanta de lumière est, *du point de vue de son contenu empirique* – c'est-à-dire du point de vue de sa capacité à résoudre des problèmes physiques – digne d'être prise en considération. Une seconde constellation, constituée cette fois d'arguments *thématiques* (et non plus physiques), vient consolider cette même conclusion.

La constellation des arguments physiques peut être vue comme une condition minimale pour que ne soit pas automatiquement et d'emblée rejetée l'hypothèse des quanta de lumière. Pour résumer de manière synthétique ce qui a été plus amplement développé précédemment : la grande confiance accordée au théorème d'équipartition (*L5*) conduit Einstein, face au dilemme 'électromagnétisme ou mécanique statistique' (*L2*), à accuser la première de ces deux théories ; l'explicitation du dilemme suggère déjà que les difficultés mises en évidence pourraient être évitées si l'éther ne possédait pas un nombre *infini* de degré de libertés (*L3*), ce qui fait naître un doute quant au caractère continu de l'énergie électromagnétique ; l'analogie formelle (*L6*) incite par ailleurs fortement à penser la lumière sur le modèle de la matière, en l'occurrence à supposer une distribution discontinue de l'énergie lumineuse ; cette hypothèse permet en outre de rendre compte d'un certain nombre d'expériences jusqu'alors incompréhensibles dans le modèle ondulatoire continu (*L7*) ; elle n'est de surcroît pas irréconciliable avec les très nombreux succès jusqu'alors obtenus par la théorie ondulatoire de la lumière, car on peut très bien envisager que l'onde constitue, à un niveau de description grossier, une approximation acceptable de la structure en quanta, cette dernière devant absolument être prise en compte à un niveau plus fin de caractérisation (*L8*).

La constellation des arguments thématiques est certainement quant à elle, aux yeux d'Einstein, ce qui confère toute sa valeur à l'hypothèse physique des quanta et fonde sa supériorité par rapport à *d'autres conjectures empiriquement acceptables*. L'hypothèse satisfait en effet les exigences thématiques les plus impérieuses d'Einstein : elle dissout le dualisme des fondements et fonctionne ainsi comme une promesse d'unification de la physique sous l'égide d'un unique thème, celui du discret.

Selon d'autres principes classificatoire encore, le réseau argumentatif proposé se laisse décomposer en une série d'arguments de force hétérogène : il comporte des démonstrations physiques irréprochables du point de vue des

normes alors en vigueur (*L2* par exemple) ; des arguments qui, sans pouvoir prétendre être des preuves logiques irréfutables, emportent pourtant, *considérés en eux-mêmes*, la conviction de la grande majorité des physiciens de l'époque (*L3* ou *L7* par exemple) ; des appréciations personnelles sur les paradigmes physiques en vigueur (*L4*, *L1* et *L1'* par exemple) ; des raisonnements logiquement non valides mais psychologiquement convaincants (*L6* par exemple)...

Il serait trop aventureux, et pour cette raison à mon sens de peu d'intérêt, de chercher à caractériser la situation plus précisément encore, par exemple de prétendre évaluer le poids respectif de chacun des facteurs explicités. Ce qui est sûr, c'est que la conviction einsteinienne doit être rapportée non pas à une seule des lignes argumentatives considérée isolément, mais à de larges fragments du réseau proposé, et sans doute d'ailleurs plutôt au réseau dans son intégralité (ainsi probablement qu'à d'autres éléments restés inaccessibles à l'historien des sciences). C'est parce différentes lignes largement indépendantes vont dans le sens de la même conclusion qu'elles se renforcent l'une l'autre mutuellement, et qu'elles rendent prises ensemble hautement plausible aux yeux d'Einstein l'hypothèse des quanta de lumière.

Bibliographie

- Balibar, F.
1992 *Einstein 1905, de l'éther aux quanta*, PUF, 1992.
- Bitbol, M.
1996 *Mécanique quantique*, Flammarion, 1996.
- Blay, M.
1983 *La conceptualisation newtonienne des phénomènes de la couleur*, Vrin, 1983.
- Brush S. G.
1967 'Foundations of Statistical mechanics 1845-1915', *Archives for Historical Studies in the Exact Sciences*, 4, 1967, pp. 145-183.
1976 *The kind of motion we call heat (an history of the kinetic theory of gases in the XIXth century)*, volume 1. Physics and the atomists, E. W. Montroll et J. L. Lebowitz éd., Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1976.
- Buchwald, J.
1985 *From Maxwell to Microphysics, Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*, The University of Chicago Press, 1985.
- Cormmach, R. Mc
1970 'H. A. Lorentz and the electromagnetic view of nature', *Isis*, 61, 1970, pp. 459-497.
- Darrigol, O.
1992 *From c-Numbers to q-Numbers, The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press, 1992.
1993 Introduction au volume sur la relativité *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 2, 1993, pp. 9-25.
- Duhem, P.
1906 *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, Vrin, 1981.
- Ehrenfest, P.
1911 'Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?', *Annalen der Physik*, 36, 1911.

Einstein, A.

- 1902 'Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik', *Annalen der Physik*, 9, 1902, pp. 417-433.
- 1903 'Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik', *Annalen der Physik*, 11, 1903, pp. 170-187 ; traduction française : 'Une théorie des fondements de la thermodynamique', *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 1, pp. 18-28.
- 1904 'Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme', *Annalen der Physik*, 14, 1904, pp. 354-362 ; traduction française : 'Théorie moléculaire générale de la chaleur', *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 1, pp. 29-35.
- 1905a 'Über einen die Erzeugung und die Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt', *Annalen der Physik*, 17, 1905, pp. 132-148 ; traduction française : 'Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière', *Albert Einstein, Œuvres choisies*, Seuil/CNRS, volume 1, pp. 39-53.
- 1905b 'Sur l'électrodynamique des corps en mouvement', *Albert Einstein, Œuvres choisies*, Seuil/CNRS, volume 2, pp. 39-53.
- 1905c 'Lettre d'A. Einstein à J. K. Habicht, printemps 1905', *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 1, p. 36.
- 1906 'La théorie du rayonnement de Planck et la théorie des chaleurs spécifiques', *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 1, pp. 75-77.
- 1909a 'Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblem', *Physikalische Zeitschrift*, vol. X, 6, 1909, pp. 185-193.
- 1909b 'Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung', *Physikalische Zeitschrift*, volume 10, 1909, pp. 817-825 ; traduction française : 'L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement' (Conférence de Salzbourg, 21 septembre 1909), *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 1, pp. 86-100.
- 1910 'Theorie der Opaleszenz von homogenen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen in der Nähe des kritischen Zustandes', *Annalen der Physik*, 33, 1910, pp. 1276-1278.

- 1911 'L'état actuel du problème des chaleurs spécifiques', dans : Langevin P., de Broglie M., (éd.), *La théorie du rayonnement et les quanta*, Gauthier-Villars, 1912, pp. 436-446.
- 1919 'Manuscrit d'Einstein de 1919, non publié, traduit dans *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 2.
- 1928 '[Lorentz, créateur et personnalité]' [1928], *Albert Einstein, Œuvres choisies*, Seuil/CNRS, volume 5, pp. 222-224
- 1936 'La physique et la réalité', *Conceptions scientifiques*, Flammarion, 1990, pp. 125-151.
- 1949 'Eléments autobiographiques', *Albert Einstein, Œuvres choisies*, éditions Seuil/CNRS, volume 2, pp. 19-57.
- 1961 'Y a-t-il une logique de la découverte scientifique?', *De Vienne à Cambridge*, Pierre Jacob (éd.), Gallimard, 1980, pp. 405-424.
- 1987 *The collected papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, volume 1 : *The early years, 1879-1902*, J. Stachel éd.
- 1989-93 *Albert Einstein, Œuvres choisies*, sous la direction de Françoise Balibar, Seuil/CNRS, 6 volumes.
- Holton, G.
- 1981a 'Einstein et la quête de l'image du monde', *L'imagination scientifique*, Gallimard, 1981, pp. 185-223.
- 1981b '*L'imagination scientifique*, Gallimard, 1981.
- Jacob, P.
- 1980 *De Vienne à Cambridge*, Pierre Jacob (éd.), Gallimard, 1980.
- Klein, M. J.
- 1963 'Einstein's first paper on quanta', *The natural philosopher*, volume 2, New-York, D. Gershenson and D. Greenberg éd., Blaisdell, 1963, pp. 57-86.
- 1967 'Thermodynamics in Einstein's thought', *Science*, 157, 1967, pp. 509-516.
- 1974 Einstein, Boltzmann's principle and the mechanical world view', *Actes du XIVème Congrès international d'histoire des sciences*, volume 1, 1974, pp. 183-194.

Les quanta de lumière d'Einstein en 1905, comme point focal d'un réseau 143
argumentatif complexe

- 1979 Fluctuations and statistical physics in Einstein's early work', in A. Einstein, *Historical and cultural perspectives, the centennial symposium in Jerusalem*, G. Holton et Y. Elkana eds., Princeton University Press, 1982, pp. 39-58.
- Kuhn, T. S.
- 1978 *Black body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*, Clarendon Press, Oxford / Oxford University Press, New-York, 1978.
- Lorentz, H. A.
- 1899 'Théorie simplifiée des phénomènes électriques et optiques dans des corps en mouvement', *Verlagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam*, 1899, 7, pp. 507-530.
- Maitte, B.
- 1981 *La lumière*, Paris, Seuil, 1981.
- Nickles, T.
- 1980 *Scientific discovery, logic, and rationality*, D. Reidel Publishing Company, 1980.
- Nye, M. J.
- 1972 *Molecular reality, a perspective in the scientific work of Jean Perrin*, Londre : Mc Donald, New-york : American Elsevier, 1972.
- Pais, A.
- 1982 *La vie et l'œuvre d'Albert Einstein*, Intereditions, 1993.
- Paty, M.
- 1996 'Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte', *Revue philosophique de Louvain*, 94, n°3 (août), 1996, pp. 447-470.
- Quine, W. V. O.
- 1951 'Les deux dogmes de l'empirisme', *De Vienne à Cambridge, l'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*, Gallimard, Pierre Jacob (éd), 1980, pp. 87-112.
- Lord Rayleigh
- 1905 'The Dynamical Theory of Gases and of Radiation', *Nature*, 72, 1905, p. 54-55.

Soler, L.

- 1997 'Les régularités phénoménales requièrent-elles une explication ?', *Physique et réalité, un débat avec Bernard d'Espagnat*, sous la direction de Michel Bitbol et Sandra Laugier, Editions Frontières, 1997, pp. 249-263.

Solvay

- 1911 *La théorie du rayonnement et les quanta*. Rapports et discussions du premier Colloque Solvay (réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911), Paris, Gauthier-Villars, 1912.

Zahar, E.

- 1983 'Logic of discovery or psychology of invention ?', *The British Journal for the Philosophy of Science*, 34, 1983, pp. 243-261.

Whittaker, E.

- 1951 *A History of the Theories of Aether and Electricity*, 2 volumes, Tomash Publisher, 1987.