

VERS UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION
DES PREMIÈRES IDÉES SCIENTIFIQUES
D'ALBERT EINSTEIN – SON ENVIRONNEMENT
SCIENTIFIQUE EN ITALIE (1895-1902)

CHRISTIAN BRACCO (*) et JEAN-PIERRE PROVOST (**)

Nota presentata dal s.c. O. Nicosini
(Adunanza del 7 giugno 2018)

SUNTO. – L'«anno miracoloso» di Einstein (1905) che lo vede pubblicare, nell'arco di qualche mese, quattro articoli e una tesi che ha caratterizzato la fisica del suo tempo, appare ben lontano dagli anni nei quali, giovane studente alla Scuola Politecnica Federale di Zurigo, (1896-1900), e, successivamente, impegnato alla redazione della tesi (1901-1902), tornava, regolarmente, a far visita ai suoi familiari a Milano. Dato che Albert Einstein si è espresso molto poco sulle sue domande e sulle sue posizioni scientifiche in questo periodo, procediamo ad analizzare queste ultime, dettagliatamente, esaminando il contenuto delle lettere che egli scrive alla sua futura moglie Mileva Marić. A tal fine facciamo riferimento a uno studio precedente riguardante l'ambiente scientifico di Einstein a Milano, pubblicato *nei Rendiconti di Scienze*. La lettura, alla biblioteca dell'*Istituto Lombardo*, del *Festschrift* di Lorentz, ha avuto un ruolo importante nelle riflessioni di Einstein nella primavera del 1901, quando si trova a Milano, in compagnia del suo amico Michele Bresso. Discutiamo, in particolare, di come la lettura di un articolo di Max Reinganum, ha portato Einstein su una “falsa pista”, conducendo il medesimo a ritirare, agli inizi del 1902, una prima tesi delle quale la tesi del 1905 prendeva il predetto Einstein in contropiede. L'articolo di Henri Poincaré, nello stesso *Festschrift*, al quale Einstein fa riferimento nel 1906, dal canto suo, ha contribuito, probabilmente, sia alla presa di conoscenza di Einstein che il tempo locale, introdotto da

(*) SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France.
E-mail: Christian.Bracco@obspm.fr

(**) Université Côte d'Azur (Professeur retraité), 720 route de la Turbie, 06360 Eze, France. E-mail: Provost@univ-cotedazur.fr

Hendrik Antoon Lorentz, sia un tempo vero, sia a una prima immagine dei quanta differente da quella di Max Planck. Quanto al passaggio sorprendente attraverso la fisica statistica (1902-1904) che portava, nel 1904, Einstein, insieme a Besso, a riallacciare i suoi rapporti con i quanta, mostreremo che è stato determinato da una lettura appassionata ma incompleta di Ludwig Boltzmann (1899-1901). In conclusione, il periodo anteriore al 1905, trascorso in parte a Milano, si rivela essere un periodo ricco scientificamente, che ha permesso, al giovane studente Einstein, di divenire l'esperto che conosciamo.

RÉSUMÉ. – L'«année miraculeuse» d'Einstein (1905), qui le voit publier en l'espace de quelques mois quatre articles et une thèse ayant marqué la physique de son temps, apparaît bien éloignée des années durant lesquelles, jeune étudiant à l'ETH de Zurich (1896-1900) puis en thèse (1901-1902), il revenait régulièrement dans sa famille à Milan. Albert Einstein s'étant très peu exprimé sur ses questionnements et ses positionnements scientifiques dans cette période, nous les analysons en détail à partir du contenu des lettres qu'il écrit à sa future femme Mileva Marić. Nous nous appuyons pour cela sur une étude antérieure portant sur son environnement scientifique à Milan publiée dans ces mêmes *Rendiconti di Scienze*. La lecture à la bibliothèque de l'*Institut lombard* du *Festschrift* pour Lorentz a joué un rôle important dans ses réflexions au printemps 1901, lorsqu'il est à Milan en compagnie de son ami Michele Besso. Nous discutons en particulier comment un article de Max Reinganum l'a mené sur une «*fausse piste*» le conduisant au retrait début 1902 d'une première thèse, dont celle de 1905 allait prendre le contrepied. Toujours dans le *Festschrift*, l'article de Henri Poincaré auquel Einstein fera référence en 1906, a de son côté probablement contribué à sa prise de conscience que le temps local introduit par Hendrik Antoon Lorentz est un vrai temps; il a pu aussi, chose surprenante, participer à une première image de quanta différente de celle de Max Planck. Quant au passage étonnant par la physique statistique (1902-1904), qui allait conduire Albert Einstein en 1904 avec Michele Besso à renouer avec les quanta, nous montrerons qu'il a été déterminé par une lecture passionnée mais incomplète de Ludwig Boltzmann (1899-1901). Finalement, la période antérieure à 1905, en partie à Milan, se révèle être une période riche scientifiquement, qui a permis au jeune étudiant Albert de devenir le savant Einstein que l'on connaît.

1. INTRODUCTION

L'année 1905 est une année bien particulière dans l'histoire de la physique. Elle voit Albert Einstein (1879-1955), alors jeune expert de troisième classe au bureau des brevets à Berne, soumettre sur une période de quelques mois quatre articles et une thèse qui ont marqué la physique de son temps: l'introduction (le 18 mars [1]) des quanta lumineux, une hypothèse «*révolutionnaire*» prêtant à la lumière une structure corpusculaire s'opposant à sa description ondulatoire; l'interpréta-

tion quantitative du mouvement brownien (le 11 mai [2]) comme une application directe de sa thèse (le 30 avril [3]) sur la détermination des tailles des molécules; la naissance de la théorie de la relativité restreinte (le 30 juin [4]), complétée par l'inertie de toute forme d'énergie (le 27 septembre [5]). 1905 apparaît donc comme une «*année miraculeuse*» en reprenant les termes de John Stachel [6], d'autant plus que ses travaux précédents sur la théorie moléculaire de la chaleur, plus espacés (le 26 juin 1902 [7], le 26 janvier 1903 [8] et le 29 mars 1904 [9]), ne laissaient pas entrevoir directement cet aboutissement, et que les premiers articles sur la capillarité (13 décembre 1900 [10]) et sur la dissociation dans les solutions conductrices (30 avril 1902 [11]) étaient jugés d'un faible intérêt par Einstein lui-même. L'année 1905 paraissant si singulière, avec l'arrivée soudaine de nouvelles idées, l'existence de liens possibles avec des questionnements ou des positionnements scientifiques bien antérieurs semble *a priori* difficile à établir,¹ en particulier pour la période où Einstein, jeune étudiant à l'ETH de Zurich (1896-1900),² puis en thèse (1901-1902), séjourne régulièrement à Milan dans sa famille [13]. Une telle étude aurait été plus simple si Einstein avait eu un statut universitaire à la sortie de son école, et avait commencé sa thèse en tant qu'assistant, ce qui l'aurait amené inévitablement à des discussions avec ses collègues, dont on aurait pu avoir un écho.

Einstein lui-même n'a guère communiqué sur ses positionnements avant 1905. Pourtant, son ami Michele Besso (1873-1955) n'a cessé dans sa correspondance, dès 1921 et pendant au moins 25 ans, de l'inciter à retracer l'histoire de ses idées, considérant qu'«*un exposé précis, avec «tes mauvaises pistes» et tes «espoirs enterrés» serait d'une valeur immense pour l'intérêt de la science*» ([14], p. 221). Einstein a surtout brossé, quand on le lui demandait, un portrait très général et très rétrospectif de ses interrogations et de ses lectures avant 1905. Il est vrai que c'était pour lui l'occasion de replacer, dans un cadre historique et philosophique, sa contribution scientifique remarquable aux côtés de celles de Isaac Newton, Ludwig Boltzmann, Hendrik Antoon Lorentz,

¹ Concernant la lumière Robert Rynasiewicz et Jürgen Renn [12] ont cependant remarqué qu'une première idée des quanta était présente à l'esprit d'Einstein en 1904, et peut-être même dès 1901.

² L'École polytechnique fédérale de Zurich: *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* [ETH].

Max Planck, etc., et l'occasion, pour satisfaire le lecteur - ou l'auditeur - de rapporter quelques anecdotes. Une des plus célèbres est celle selon laquelle à l'âge de seize ans il se voyait «*poursuivre un faisceau lumineux à la vitesse c*», anecdote dans laquelle disait-il «*la théorie de la relativité est déjà contenue*» [15]; mais aucun historien ne peut sérieusement en tirer profit.

Einstein a été discret sur son environnement scientifique dans la période 1895-1896 qui a précédé son entrée à l'ETH. On ne connaît exactement ni quand, ni dans quel cadre, ont commencé ses discussions avec Michele Besso, dont il dira plus tard qu'il a été pour lui la meilleure caisse de résonance de toute l'Europe. Einstein n'a jamais commenté la «*fausse piste*» discutée dans [16], sur laquelle nous revenons à la section 2, qui concerne les forces moléculaires et l'idée qu'on pourrait se passer des dimensions des molécules, «*ce concept mathématiquement si peu clair*» ([17], L. 29). Elle l'a conduit à une thèse soumise au professeur Alfred Kleiner de l'université de Zurich fin 1901, dont il a difficilement vécu le retrait début février 1902; une thèse dont il prendra le contrepied en 1905 en s'intéressant à ces dimensions moléculaires, toujours avec Kleiner. Einstein a aussi associé dans ses notes autobiographiques ses trois articles de physique statistique au souci «*de trouver des faits qui garantissaient autant que possible l'existence d'atomes d'une taille bien définie*» [15]; il s'agissait en fait surtout pour lui, comme on l'analysera à la section 3, de clarifier des lectures antérieures (1899-1901) de Boltzmann. Il ne signale pas en particulier que l'idée de quanta était déjà présente en 1904 à la fin du troisième article, probablement en liaison avec des discussions partagées avec Michele Besso au printemps 1901 à Milan; nous revenons sur les quanta avant 1905 à la section 5.³ En ce qui concerne la théorie de la relativité restreinte, Einstein en a parlé à plusieurs reprises, et les articles sur sa possible genèse sont très nombreux. Certes, la période qui va de la date (1898) à laquelle il dit y avoir pensé pour la première fois en liaison avec la lecture du livre de Ernst Mach *La mécanique, exposé historique et critique de son développement*, à la date de la lecture (entre 1902 et 1904) de *La science et l'hypothèse* de Henri Poincaré, a été examinée en détail en tenant compte des nombreux

³ Abraham Pais [18] a remarqué aussi qu'il était étonnant qu'Einstein ne mentionne pas les quanta quand il introduit le principe d'équivalence en 1911, alors qu'ils sont implicitement présents dès le début de son article.

ouvrages [6] lus par Einstein. Mais cet examen est souvent resté sur un terrain essentiellement factuel et académique. Enfin, si pour préciser quand Einstein a pris conscience de l'idée de relativité et de la nécessité de rejeter l'éther⁴ il a été fait état d'interrogations du jeune Einstein, jamais une dynamique globale de ses positionnements n'a été développée, ce que nous tenterons de faire dans la section 4.

Pour comprendre de manière plus précise les idées d'Einstein avant 1905, il pourrait y avoir la correspondance contemporaine avec Michele Besso, mais les lettres de cette période, réduites à trois, nous apprennent seulement (en 1903) qu'il pense à l'hydrodynamique et à la taille des ions (prélude à sa future thèse) et qu'il y a eu des remarques (perdues depuis) de Michele (alors à Trieste), concernant les deux premiers articles de physique statistique, avant qu'il ne rejoigne Albert le 1^{er} janvier 1904 au Bureau des brevets ([14], p. xxiv). Pour parvenir à établir un lien entre l'avènement des articles de 1905 et les années qui précèdent, nous nous baserons sur les lettres d'Albert Einstein à sa condisciple à l'ETH et future femme, Mileva Marić (1875-1948), correspondance dont nous examinerons en détail le contenu scientifique [17]. Ces lettres, Albert les écrit principalement entre 1898 et 1901, quand il séjourne à Milan, pendant les vacances semestrielles de l'ETH et qu'il se trouve séparé de Mileva. Il trouve en Michele un ami «à l'esprit extrêmement fin», qui l'accompagnera tout au long de son développement scientifique jusqu'en 1915, c'est-à-dire pendant l'essentiel de sa production scientifique. Les échanges avec Michele Besso passent par des discussions quasi-quotidiennes pendant la période 1899-1901 quand ce dernier réside à Milan. En septembre 1900, Albert écrit ainsi à Mileva «*le soir, je suis souvent chez Michele*» et il précise le 4 avril 1901 quelques sujets abordés: «*Hier soir, pendant quatre heures, j'ai pris grand intérêt à parler boutique avec lui [Michele]. Nous avons discuté de la séparation essentielle de l'éther lumineux et de la matière, de la défini-*

⁴ On ne dispose pas d'informations précises sur la période 1902-1905. Il est possible que cette prise de conscience se soit faite subitement au printemps 1905 parallèlement aux réflexions sur les quanta. Dans la préface du livre de Stachel [6], au sujet des quanta et de la relativité, le célèbre physicien Roger Penrose affirme: «*Pour moi il est virtuellement inconcevable qu'il [Einstein] ait proposé la même année deux papiers dépendant de conceptions de la nature qu'il sentirait être en contradiction*». Nous verrons section 4 (en particulier note 30) que relativité et quanta arrivent simultanément fin 1900 dans la littérature scientifique.

tion du repos absolu, des forces moléculaires, des phénomènes de surface, de la dissociation» ([17], L. 26), des sujets qu'il qualifie aussi de «*nos recherches*» quand il écrit à Mileva, mais de «*mes recherches*» dans tout autre contexte.

Considérés ensemble et reliés dans le cadre de leur environnement scientifique, ces témoignages révèlent cependant un tableau vivant assez précis, qui donne une place centrale aux réflexions d'Albert Einstein à Milan entre 1899 et 1901. Dans ce tableau, il faut comprendre ses commentaires et ses interrogations comme celles d'un étudiant passionné, assoiffé de lectures scientifiques, et n'hésitant pas, à la suite de celles-ci, à émettre des hypothèses qu'il abandonnera ensuite pour d'autres. On ne peut imputer à l'homme de science que sera Einstein, à partir de 1905, la naïveté, l'inexpérience, voire les erreurs du jeune Albert. Inversement, ce serait un contresens historique de projeter le savant Einstein sur l'étudiant Albert. En particulier quand ce dernier parle de «*théorie*» sans plus de précisions, il ne s'agit que d'idées, parfois éphémères, même si elles peuvent être intéressantes. Aussi prendrons-nous la précaution de distinguer au niveau du texte de cet article «*Albert*» avant 1905 de «*Einstein*» après, pour éviter toute confusion. Il faut noter aussi que la partie scientifique des lettres d'Albert à Mileva est très limitée, avec parfois des interruptions longues, et assez souvent des absences de références explicites aux lectures. La compréhension de certaines périodes, comme celle, très intense du printemps 1901, où Albert lit à la bibliothèque de l'*Académie des sciences et des lettres de l'Institut lombard* le *Festschrift* pour Lorentz sans s'y référer, nécessite une étude historique parallèle de son environnement. Nous rappelons à la section 2 quelques résultats de cette étude publiés dans les *Rendiconti* de l'*Institut lombard* en 2014 [19] et dans le livre *Quand Albert devient Einstein* [13] (traduit en italien en 2019).

2. EINSTEIN À MILAN ET LA THÈSE ABANDONNÉE

Le travail historique [13,19] sur cet environnement scientifique a été mené à Milan à l'*Institut lombard* et aux bibliothèques de mathématiques de l'université et de l'*Ecole Polytechnique* de Milan; à Pavie aux archives de l'université et aux archives diocésaines; par des contacts personnels établis avec les familles Cantoni et Besso à Milan, à Rome et en Suisse; enfin, par la restitution du cadre industriel, technique et

financier des années 1890-1900 en Italie grâce à une documentation abondante. Ces recherches, qui permettent de replacer les lettres d'Albert à Mileva ou les allusions rétrospectives de Michele Besso dans leur contexte, nous ont permis d'établir un certain nombre de résultats nouveaux que nous présentons ici chronologiquement.

La rencontre d'Albert Einstein et de Michele Besso a eu lieu en 1895 avant la première tentative d'Albert d'entrer à l'ETH en octobre. En effet, dans une lettre datée du 10 octobre 1945, Michele lui écrit «*N'est-ce pas à nouveau notre point de départ d'il y a plus de cinquante ans, entre Newton et Huygens ?*», ce qui situe sans ambiguïté la date de cette première rencontre avant le 10 octobre (voir p. 75, note 4 de l'édition italienne [13]). On peut même ajouter que l'allusion de Besso à cette première rencontre célèbre son cinquantième anniversaire. Les précisions apportées dans [13,19] montrent que cette rencontre intervient dans le contexte de l'industrialisation électrique de l'Italie, où évoluent les familles Einstein et Besso, cette dernière jouant même un rôle déterminant: avec Marco Besso (qui deviendra président des *Assicurazioni Generali*), Beniamino Besso (directeur d'une compagnie de chemins de fer) ou Vittorio Cantoni, du côté de la mère de Michele, ingénieur de l'ETH et de l'*École polytechnique* de Milan (qui implante les premiers transformateurs en 1886 à l'usine électrique de Tivoli près de Rome). Les Einstein et les Besso ont un ami commun, le ministre des finances, enseignant à l'*École polytechnique* de Milan, le professeur Luigi Luzzatti. Maja Einstein-Winteler, la sœur cadette d'Albert, dira à son propos qu'Albert s'en était fait un ami paternel à l'été 1895 à Airolo sur le Gotthard. Quoi de plus naturel pour Michele et Albert d'entrer en contact en 1895, au moment où ce dernier cherche à entrer à l'ETH sans avoir l'âge requis (il n'a que seize ans) et sans diplôme (il n'a pas son baccalauréat) ? Michele vient tout juste d'en sortir (promotion 1895) et il est possible qu'il l'ait alors aidé à se préparer au concours de l'ETH. En tout cas, la richesse des réflexions d'Albert en mars-avril 1901 n'est pas sans lien avec Michele, qu'il voit alors à Milan «*le soir*» et de manière quasi-quotidienne.⁵

⁵ Cette richesse apparaît aussi dans une lettre du 13 juin 1913, découverte au cours de nos recherches à la fondation Marco Besso à Rome [13], où Michele conclut: «*Tra giorni, credo, rivedrò i miei, rivedrò a Trieste il caro zio, e se i medici lo permetteranno (non ho veramente motivi di dubitarne), ritornerò qua [a Zurigo], ad assistere alla lotta*

Un second résultat de ce travail est qu'Albert Einstein était lié amicalement non seulement à Ernestina Marangoni à Pavie, jeune fille issue de la bourgeoisie, alors âgée de dix-neuf ans, mais était lié aussi à son oncle Carlo, physicien très connu, ancien étudiant et assistant de Giovanni Cantoni à l'université de Pavie en 1865-66, puis de Carlo Matteucci à Florence à l'*Institut technique*. Carlo rendait visite à son frère Giulio, le père d'Ernestina, une fois l'an pendant la période des vendanges à Casteggio, près de Pavie, une période qu'Albert passait alors dans la famille Marangoni. Carlo était entre autres spécialiste des phénomènes de capillarité (*cf.* l'effet Gibbs-Marangoni) et on comprend bien l'intérêt d'Albert pour ce domaine. Son ancien directeur de thèse, Giovanni Cantoni, était connu en particulier pour avoir donné le premier une explication cinétique du mouvement brownien en étendant la loi de distribution de Maxwell aux particules browniennes, concluant que leur mouvement est «*une des démonstrations expérimentales les plus belles et les plus directes des principes fondamentaux de la théorie mécanique de la chaleur*» [13,20]. Si Carlo en a parlé avec Albert, il n'est pas étonnant qu'à la suite de sa thèse [3] l'application au mouvement brownien soit venue soudainement à l'esprit d'Einstein, comme il l'a rapporté à Robert Shankland en 1952 [21].

Une lecture précise des lettres à Mileva, avec en tête la recherche du lieu où Albert Einstein poursuivait son travail scientifique (entamé à Zurich) pendant les vacances semestrielles de l'ETH, a permis d'établir que la «*bibliothèque*» à laquelle il fait référence à plusieurs reprises était celle de l'*Institut lombard* [13,19]. Son accès peut lui avoir été permis par Giuseppe Jung, un oncle maternel par alliance de Michele Besso, membre de l'*Institut* et professeur de mathématiques à l'*École polytechnique* de Milan. Albert mentionne dans une lettre à Mileva du 4 avril 1901 que Jung «*l'un des professeurs les plus influents en Italie*», doit intercéder en sa faveur auprès de «*ses amis*», «*les professeurs italiens les plus réputés*» ([17], L. 26) Augusto Righi et Angelo Battelli, en vue d'obtenir un poste d'assistant. Mais cet accès aurait pu lui être permis aussi directement par Giuseppe Colombo, président de l'*Institut*. Colombo avait supervisé le rachat de l'entreprise *Einstein, Garrone et Cie* à Pavie pour le compte de son bras droit, l'ingénieur Carlo Monti,

dell'amico Einstein col grande Ignoto: opera e tormento da gigante, a cui assisto da pigmeo, ma da pigmeo veggente".

avec lequel il avait réalisé l'éclairage de la Scala de Milan en décembre 1883. La bibliothèque de l'*Institut lombard*, alors au palais *Brera*, est richement dotée. Elle est la seule à contenir à cette époque à Milan les articles qui apparaissent dans les lettres à Mileva et qui figurent dans les *Annalen der Physik und Chemie*, les *Annalen der Physik* et leurs *Beiblätter*. Elle ne possède en revanche pas les livres qu'Albert demande à Mileva de lui faire parvenir; enfin elle se trouve très proche du lieu de résidence de la famille Einstein au 21 rue Bigli.⁶ La connaissance du lieu où travaille Albert à Milan a été déterminante pour comprendre les références scientifiques à Wilhelm Wien, Planck, Max Reinganum et Paul Drude, qui sont contenues dans les lettres. Le volume du *Festschrift* pour Lorentz qui paraît dans les *Archives néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* [23], remis à Lorentz le 11 décembre 1900 pour le 25^{ème} anniversaire de sa thèse de doctorat, est reçu à la bibliothèque de l'*Institut* le 31 janvier 1901. Il a pu jouer un rôle important dans les réflexions d'Albert au printemps 1901. En effet, couvrant les principaux sujets d'actualité avec environ 70 contributions, il apparaît comme un ouvrage incontournable pour un étudiant en thèse. On y trouve, comme on le verra, des articles de Reinganum, Planck et Poincaré mais aussi des articles de Daniel Berthelot, Georg Hartley Bryan, Emil Georg Cohn, Heike Kammerling Onnes, Righi, Emil Wiechert, Wien, etc.

Les sources bibliographiques disponibles à l'*Institut lombard* doivent être complétées par l'analyse du contenu de la bibliothèque personnelle de Giuseppe Jung léguée par sa fille Maria Vittoria en 1926 aux bibliothèques de mathématiques de l'*École polytechnique* et de l'université de Milan. Elle comporte environ 2500 tirés-à-part d'articles mathématiques et 500 livres, essentiellement des ouvrages de mathématiques et quelques rares ouvrages de physique (dont le traité de Gustav Kirchhoff, celui de James Clerk Maxwell ou de Johannes Diderick Van der Waals). Fait remarquable pour une bibliothèque de mathématicien,

⁶ Notons aussi que le lien avec Colombo, du point de vue industriel, se double d'un lien avec Galileo Ferraris, sur les aspects techniques, et notre étude a bénéficié des recherches du professeur Andrea Silvestri, de l'*École polytechnique* de Milan, membre de l'*Institut lombard*, qui a trouvé la plus ancienne lettre rédigée par Albert Einstein, datée du 12 août 1895 à Pavie, où il demande à Ferraris «une petite recommandation privée» auprès du professeur Weber de l'ETH [22].

elle contient la plupart des ouvrages récents sur l'électricité et la télégraphie sans fils, publiés entre 1899 et 1901. Dans cette période, Michele Besso travaille à Milan dans une compagnie pour le développement électrique et aussi peut-être à une thèse sur la télégraphie sans fil, un sujet sur lequel Albert dit réfléchir à Mileva en septembre 1900 pour le compte de Michele [13, 24]. Parmi ces ouvrages trois sont de Henri Poincaré, qui, soit dit en passant, n'intéressait visiblement pas directement Jung en tant que mathématicien (il n'en possédait qu'un tiré-à-part). Nous verrons à la section 4 quel usage de *Electricité et Optique* de Poincaré a pu être fait au printemps 1901, s'il a été consulté par Michele ou Albert.⁷ Rappelons enfin que parmi les tirés-à-part, les seuls articles de physique présents sont ceux d'Albert Einstein entre 1901 et 1906, correspondant à ses douze premières publications (qui malheureusement, n'ont pas été conservées).

L'identification de la bibliothèque de l'*Institut lombard* comme lieu de travail d'Albert Einstein nous a permis, en croisant le contenu scientifique des lettres à Mileva, de découvrir qu'il s'intéresse prioritairement à un article de Max Reinganum publié dans le *Festschrift* pour Lorentz. La lecture de cet article va le pousser à réorienter sa thèse avec comme conséquence importante son abandon ultérieur [16] comme nous le rappelons maintenant. En octobre 1900, on apprend par une lettre à Mileva qu'Albert a trouvé récemment à Zurich des «résultats sur la capillarité [...] sembl[ant] totalement inédits» ([17], L. 23) et qu'il compte avec elle «trouver des données empiriques» auprès de Kleiner, avec qui il s'inscrira en thèse. Fin décembre, il soumet sur ce sujet un article aux *Annalen* [10]. Notre objectif ici n'est pas de rappeler les motivations d'Albert pour la capillarité ou d'entrer dans le contenu exact de cet article (voir [13], chapitre VI), mais d'examiner en quoi il a constitué une «fausse piste» sanctionnée par le retrait d'une première thèse. L'idée d'Albert, reprise aux chimistes (Wilhelm Ostwald, Roberto Schiff,...), mais fausse, est que chaque élément chimique est caractérisé par un coefficient spécifique qui joue, vis-à-vis des forces moléculaires, le même rôle que la masse pour la gravitation (avec une loi universelle différente de $1/r^2$ mais

⁷ L'exemplaire de la bibliothèque de Jung porte la marque «*Hommage des éditeurs*». Comme Poincaré l'a déposé à la bibliothèque de l'*Institut de France* le 14 décembre 1900, on ne peut douter qu'il était présent début 1901 dans la bibliothèque de Jung.

restant indéterminée). L'examen d'une quarantaine de composés organiques et l'usage d'une méthode des moindres carrés le conduit aux valeurs (à un facteur près) de ces coefficients pour les éléments H, C, O, Cl, Br, I. Albert se sert de cet article pour tenter d'obtenir un poste d'assistant, notamment auprès de Ostwald, mais en vain. Pour Mileva, en décembre, la thèse devait être soutenue vers Pâques 1901; mais une prolongation inattendue a lieu. Le 14 avril, Albert écrit à son ami Marcel Grossmann: «*En ce qui concerne la science, j'ai eu quelques idées splendides, qui ne nécessitent maintenant qu'une incubation appropriée. Je suis maintenant convaincu que ma théorie des forces d'attraction atomiques peut aussi être étendue aux gaz, et qu'il sera possible d'obtenir les constantes caractéristiques de presque tous les éléments, sans beaucoup d'efforts. Cela va également amener le problème de la parenté interne entre forces moléculaires et action à distance newtonienne beaucoup plus proche de sa solution. Il est possible que les expériences déjà faites par d'autres avec d'autres objectifs vont suffire pour tester la théorie. Dans ce cas, je vais utiliser tous les résultats existants dans ma thèse de doctorat*» (voir CPAE 1 in ref. [17], pp. 315-316). Le lendemain, il s'adresse en des termes analogues à Mileva, comptant «*déterminer un grand nombre de c_a* » ([17], L. 28) à partir des gaz et des solutions salées diluées. Comme nous l'avons montré, l'article de Max Reinganum sur *Les forces moléculaires dans les gaz faiblement comprimés* [25] dans le *Festschrift* pour Lorentz, où l'auteur obtient l'équation d'état des gaz à partir seulement des forces d'attraction «*planétaires*» tout en s'affranchissant de la taille des molécules, a dû attirer son attention. En effet, Albert connaît Reinganum (cité par Boltzmann dans ses *Leçons sur la théorie des gaz* [26]) et a même écrit le 12 avril à Kammerling Onnes, le directeur de son laboratoire à Leyde, pour un poste d'assistant. Il sait que négliger les dimensions moléculaires est contraire à tous les travaux bien connus sur le sujet (Berthelot critique par exemple l'approche de Reinganum dans le même *Festschrift* [27]). Mais il persiste avec les c_a et remet sa thèse à Kleiner en novembre. Par les lettres à Mileva, on apprend le 28 qu'Albert n'a pas encore reçu de rapport de sa part et ne croit pas «*qu'il ose refuser [s]a thèse*»; puis le 12 décembre que «*Kleiner ne [lui] a pas encore écrit*» et le 17 qu'«*il tarde à [lui] répondre*». Le 19, Albert informe Mileva qu'il compte dédier sa thèse de doctorat à Marcel Grossmann pour le remercier de l'avoir aidé à obtenir un poste aux Bureau des brevets à Berne, puis, se comparant à ses condisciples de l'ETH, il ajoute le 28: «*Tu vois c'est ton Jobontzel [Albert] qui a fini son travail [de thèse] le premier*». En décembre, Mileva

confirme à son amie Helena Savić que la thèse est achevée: «*Albert a écrit une magnifique étude, qu'il a soumise comme thèse. Il obtiendra probablement un doctorat dans quelques mois [...]. Le sujet porte sur la recherche des forces moléculaires dans les gaz en utilisant différents phénomènes connus*» (voir CPAE 1, pp. 319-320).

Début février 1902, Albert Einstein retire sa thèse (un manuscrit aujourd'hui disparu). Il est très vraisemblable que Kleiner ait demandé un avis à Boltzmann, pour lequel le refus d'Albert de prendre en compte les dimensions moléculaires a dû paraître constituer une erreur grossière. Néanmoins, Albert soumet peu après un deuxième article dans les *Annalen* [11], dans lequel les c_a sont introduits pour les ions et les solvants, mais sans pouvoir en déduire de valeurs en raison des multiples hypothèses faites. Il est probable que l'acceptation de cet article, avec l'aide de Kleiner, a été une forme de compensation au retrait de la thèse. D'ailleurs, à la fin de l'article, Albert s'excuse de n'avoir présenté «*qu'un maigre projet pour des recherches laborieuses sans contribuer en quoi que ce soit à leur solution expérimentale*». Précisons que dans le comité de rédaction des *Annalen*, il y avait en particulier Planck qui a dû apprendre à cette occasion, qu'en attendant sa soutenance, Albert travaillait à combler «*un gap*» dans la théorie de Boltzmann pour «*fournir une [vraie] expression mathématique de l'entropie du point de vue de la mécanique*» (voir introduction de [7]). L'éditeur en chef des *Annalen* était Drude, à qui Albert avait envoyé, comme il le dit à Mileva début juin 1901, «*une longue lettre [...] contenant deux objections à sa théorie des électrons*» assurant que Drude «*aura sûrement bien du mal à les contrer de façon logique*» ([17], L. 37), et ajoutant qu'il lui a parlé de sa recherche de poste.⁸ Quelques jours plus tard, il apparaît que Drude a dû répondre sèchement. Mais il n'a visiblement pas tenu rigueur à Einstein de son courrier maladroit. Finalement, une «*fausse piste*» scientifique allait se terminer par un tournant vers la physique statistique et une place reconnue dans la science allemande.

⁸ Il est possible aussi qu'Einstein ait parlé dans sa thèse de façon critique de la théorie de Drude à la suite de la lecture d'un autre article de Reinganum, où ce dernier signale que l'application de la cinétique à des électrons libres pose un problème concernant les chaleurs massiques (Renn [28] avance que cela aurait contribué au rejet de la thèse). Reinganum dit aussi que la taille d'un électron ne doit pas intervenir dans la théorie (ce qui a dû séduire Albert) alors que Drude donne un modèle électromagnétique de la taille et de la masse de l'électron.

3. LA LECTURE INCOMPLÈTE DE BOLTZMANN (1899-1901) ET L'INTÉRÊT POUR LA PHYSIQUE STATISTIQUE (1902-1904)

La lecture de Boltzmann par Albert Einstein a joué aussi un rôle important dans l'orientation des travaux qui ont conduit à sa thèse abandonnée et a été déterminante pour son tournant vers la physique statistique. On peut la suivre à travers sa correspondance avec Mileva. La première référence à Boltzmann dans les lettres date de la fin de l'été 1899. Le 10 septembre, Albert envisage de se «faire envoyer d'ici une semaine à Milan les livres de Helmholtz, Boltzmann et Mach [qui ne sont pas présents à la bibliothèque de l'*Institut lombard*] par la Bibliothèque [municipale de Zurich]», ajoutant à Mileva «je vous promets solennellement de tout retravailler avec vous» ([17], L. 10). La lecture désirée du livre de Hermann von Helmholtz est liée comme on le verra à la section 4 à des questionnements sur la théorie électromagnétique et sur le mouvement possible de l'éther lumineux. L'appel simultané à Boltzmann, grand défenseur de l'existence des atomes, sujet qui intéresse le jeune Einstein, et à Mach dont la philosophie pragmatique lui a été vantée par Michele, est probablement lié au combat que Boltzmann engage à partir de 1895 contre les énergéticiens, principalement Georg Helm, Ostwald et Mach.⁹ Ceux-ci s'appuyaient sur les travaux de thermodynamique de Josiah Willard Gibbs qu'Ostwald avait publiés en allemand en 1892 (malgré semble-t-il quelques réticences de l'auteur [30]). Contrairement à Gibbs et à Planck, qui tous deux accordaient un rôle essentiel à l'entropie, ils plaçaient le concept d'énergie macroscopique au-dessus de tout et excluaient une explication de la chaleur et du second principe en termes de mouvements moléculaires. Helm avait écrit en 1896 sur l'énergétique un article de référence dans les *Annalen* (suivi d'un livre en 1898 sur son développement historique) et Mach s'était dépêché, la même année, de publier ses *Wärmelehre* ([29], p. 208); de son côté, Planck, lui aussi vivement

⁹ À propos de la polémique de Boltzmann avec Ostwald lors d'un meeting à Lübeck en 1895, le physicien théoricien Arnold Sommerfeld rappelle à l'occasion du centenaire de la naissance de Boltzmann: «Le champion de l'énergétique était Helm ; derrière lui se tenait Ostwald et derrière les deux la philosophie de Ernst Mach [...]. L'opposant était Boltzmann secondé par Felix Klein [...]. Nous, jeunes mathématiciens, étions du côté de Boltzmann» ([29], p. 27).

opposé aux énergéticiens, avait publié en 1897 un ouvrage moderne et très complet de thermodynamique [31] qui ne se basait pas sur l'hypothèse atomique mais ne la niait pas non plus. En 1898, Albert avait déjà eu des notions de théorie cinétique des gaz à travers le cours de thermodynamique du professeur Heinrich Friedrich Weber à l'ETH; la validation possible de l'hypothèse atomique était d'actualité.

Mais en dehors de leur intérêt intrinsèque, les trois livres commandés à la bibliothèque de Zurich doivent, dans l'esprit d'Albert Einstein, les aider, Mileva et lui, à proposer au professeur Weber un sujet de travail pour leur diplôme de fin d'études en 1899-1900. Après avoir évoqué fin septembre à Mileva un «*travail sur le mouvement relatif de l'éther lumineux par rapport à la matière pondérable que le «patron» traite avec tant de mépris*» ([17], L. 11), Albert revient prudemment à la thermodynamique de Weber. Le 10 octobre, il parle de «*thermoélectricité*» et d'une méthode ne nécessitant «*aucun appareil qui ne nous serait pas facilement accessible*» (dans le laboratoire de Weber), méthode qui permettrait de déterminer le «*thermoélément*» qui serait «*responsable de la chaleur latente dans les métaux*». ¹⁰ Weber n'a pas dû donner son accord car Einstein dira plus tard que le diplôme (passé en juillet 1900 en collaboration avec Mileva) a porté sur la conduction thermique. Albert reviendra à la thermoélectricité quand il envisagera de travailler à une thèse dans le laboratoire de Weber fin août. Il parlera alors à Mileva de «*l'effet Thomson*», qui désigne l'échange thermique avec l'extérieur qu'a une jonction entre deux métaux lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. Le «*thermoélément*» est ici clairement constitué par les charges mobiles dont l'entropie dépend du métal. Mais Albert abandonnera ce sujet pour la capillarité en octobre 1900.

Le livre de Boltzmann emprunté par Albert Einstein est le tome 1 des *Leçons sur la théorie des gaz* [26]. Pendant l'année de diplôme, il a pu lui servir à travers la référence que Boltzmann fait dans sa préface au traité d'Oskar Emil Meyer «*si notoirement précieux pour les chimistes et étudiants en chimie physique*», ¹¹ référence répétée à la fin du chapitre I où il est question notamment de conduction thermique (sujet du diplôme) et

¹⁰ Il s'agit plutôt de chaleur spécifique des métaux, un sujet sur lequel Albert reviendra au printemps 1901 en lien avec ses lectures de Eduard Riecke, Reinganum, Drude, etc. La question est de savoir lequel de la matière ou des charges en est le responsable.

de libre parcours moyen des molécules. Mais il n'apparaît dans les lettres à Mileva qu'un an plus tard, à la fin de l'été 1900, quand Albert réfléchit à un sujet de thèse et a le temps de lire cet ouvrage souvent très théorique et rempli de calculs non triviaux. Le 19 septembre, sa critique est élogieuse: «*Le Boltzmann est vraiment fantastique. Je l'ai presque fini. C'est un maître dans l'art de présenter les choses. Je suis persuadé de la justesse des principes sur lesquels repose sa théorie*» ([17], L. 21). Et il précise, se limitant à des propos que Boltzmann tient dans la toute première section (section 3) du premier chapitre (qui couvre les sections 3 à 14): «*C'est-à-dire que je suis convaincu qu'il s'agit réellement dans le cas des gaz d'un mouvement de masses ponctuelles discrètes de grandeur finie bien déterminée et dont le mouvement est soumis à certaines conditions*».¹² Concernant les forces (qui joueront un rôle essentiel dans sa thèse abandonnée) il ajoute: «*Boltzmann insiste à juste titre sur le fait que les forces hypothétiques entre molécules ne sont pas un élément essentiel de sa théorie étant donné que toute l'énergie est de nature cinétique*». Albert ne fait aucune mention dans ce chapitre des sujets qui tiennent à cœur à Boltzmann et qui l'occuperont à partir de 1902, comme ceux ayant trait à la grandeur H et son rapport à la distribution d'équilibre, l'entropie et l'irréversibilité

¹¹ Boltzmann écrit dans la préface de son livre en 1895 que l'époque lui paraît mal choisie, que «*la théorie des gaz est pour ainsi dire passée de mode en Allemagne*» et qu'«*il vient de paraître une deuxième édition du célèbre traité d'O. E. Meyer*». Mais il rappelle que ses propres recherches «*ont été citées avec estime par Kirchhoff dans ses Leçons sur la théorie de la chaleur*» [qu'Albert consultera] et par Poincaré tout à la fin de sa *Thermodynamique* «*mais non utilisées quand l'occasion s'en présentait*», et il conclut à la nécessité d'«*une nouvelle exposition de quelques-uns de leurs principaux résultats*». Il ajoute avoir été influencé par «*l'inoubliable congrès de la British Association tenu à Oxford [en 1894] et aussi [les] lettres écrites par de nombreux savants anglais [...] en partie publiées dans Nature*» (journal où Boltzmann a participé à la discussion en 1895). Le congrès, initié par Joseph Larmor et Bryan portait sur «*l'état actuel de notre connaissance de la seconde loi*» avec notamment ses aspects statistiques et la démonstration par Boltzmann de l'irréversibilité appelée H -theorem au congrès ([29], p. 129). Les savants allemands étaient absents. Mais la polémique lancée fin 1895 par Ernst Zermelo, assistant de Planck, allait permettre à Boltzmann de s'exprimer dans les *Annalen* ([32], pp. 397-402).

¹² Ces conditions, au nombre de trois, concernent le calcul du nombre de chocs moléculaires. Les deux premières, triviales, définissent les éléments de volume dans l'espace et dans l'espace des vitesses. La troisième, développée par Boltzmann, est l'hypothèse de chaos moléculaire discutée au congrès d'Oxford de 1894.

thermodynamique (sections 4 à 8).¹³ Certes, il ne mentionne pas non plus l'obtention par Boltzmann des équations hydrodynamiques du chapitre II (sections 15 à 20) intitulé «*Les molécules sont des centres de force – cas de forces extérieures et de mouvements sensibles du gaz*», ou encore du chapitre III «*Les molécules se repoussent avec une force inversement proportionnelle à la cinquième puissance de leur distance*». Mais il a dû cependant examiner toutes ces questions car il affirme le 19 septembre à Mileva: «*J'ai étudié tout le Boltzmann et un bout des harmoniques sphériques qui m'intéressent en fait maintenant pas mal*». Ces fonctions apparaissent à la section 22 du chapitre III (qui reprend les calculs du chapitre II), avec en note une référence à un livre de Eduard Heine qu'Albert conseillera à Mileva en avril 1901 pour un travail lié à la conduction thermique ([13] chapitre V). Quand le 15 avril 1901, Albert compte, comme on l'a vu, étendre aux gaz les constantes c_a de la capillarité, il fait implicitement référence pour Mileva à la section 17 du chapitre II intitulée *Dérivée par rapport au temps de sommes étendues à toutes les molécules d'une région*: «*Tu te rappelles sûrement que la force figure de façon explicite dans les intégrales qu'il faut calculer pour déterminer les coefficients de diffusion, de conduction thermique et de viscosité*». Si Albert semble bien se souvenir du tome 1 des *Leçons* en 1901, il n'y fera pas référence dans les trois articles de physique statistique de 1902, 1903 et 1904. Pourtant, à la section 6 (voir note 13) Boltzmann présente (certes rapidement) son nombre W de complexions d'où découle l'entropie et l'explication générale (non cinétique) de l'irréversibilité. Mais surtout, il renvoie, dans le

¹³ La grandeur H est ici l'intégrale $\int f \ln f d\omega$ où f est la densité de molécules dans l'espace des vitesses. À la section 4, Boltzmann calcule l'effet des collisions sur l'évolution temporelle de f et montre que la distribution de Maxwell des vitesses moléculaires rend f stationnaire. À la section 5, il montre que celle-ci «*est la seule possible*» car « *H ne peut que décroître [$dH/dt < 0$] en absence d'organisation moléculaire*». À la section 6 *Signification mathématique de la fonction H* il relie $-H$ au logarithme du nombre (qu'il note Z) $W = n!/(n_1! n_2! \dots)$ correspondant à la répartition des molécules dans un espace des vitesses discret. Il qualifie Z de «*probabilité relative*» et (en se référant à son article du 11 octobre 1877 ([32], pp. 205-214)) associe la décroissance de H à l'évolution de la répartition des vitesses vers «*la répartition la plus probable*». Enfin, à la section 8 *Chaleurs spécifiques. Signification physique de la grandeur H* , il établit la proportionnalité de $-H$ à l'entropie dans le cas d'un gaz monoatomique, suggérant qu'elle est générale et que «*Le deuxième principe de la thermodynamique apparaît par conséquent comme un théorème de probabilité*».

texte (et non pas en note, ce qui constitue un cas unique dans les deux tomes), le lecteur à son article fondamental du 11 octobre 1877 (voir note 13). C'est d'ailleurs à cette section 6 que se référera Planck dans son article de juillet 1903 pour le *Festschrift* de Boltzmann quand il comparera la définition de l'entropie de Boltzmann à celles de Gibbs de 1902 [33] et conclura que «*parmi toutes celles connues jusqu'à maintenant [elle est] la plus adéquate et la plus puissante*» [34]. Certes, il avait utilisé dès janvier 1901 la formule $S = k \ln W$ pour les quanta d'énergie (cf. section 5)!

Dans les lettres à Mileva, le nom de Boltzmann ne revient qu'en février 1902, quand la thèse sera abandonnée. Mais il est certain, qu'après avoir fini le tome 1 des *Leçons sur la théorie des gaz* qui l'a enthousiasmé, Albert Einstein a dû se procurer le tome 2 dès l'été 1900. Cette lecture va l'accompagner pendant un an et être à l'origine, en partie, à la fois de sa thèse abandonnée et de son passage à la physique statistique. Dans les deux premiers chapitres, Boltzmann revient en détail sur la théorie de Van der Waals de l'état fluide (gaz-liquide). Albert a dû découvrir notamment à la section 1 «*la nécessité de supposer qu'il existe entre deux molécules une force d'attraction [...] [car] il est prouvé maintenant qu'on peut liquéfier tous les gaz*» (l'existence de cette force n'excluant pas la dimension des molécules); il a dû aussi être admiratif, aux dernières sections (22-23), qu'un même calcul conduise à la «*pression moléculaire*», la «*chaleur de vaporisation*» et «*aux équations fondamentales de la capillarité*». Cette lecture est l'occasion pour lui de se replonger dans les conférences de Hermann Minkowski du printemps 1900 à l'ETH sur la capillarité (plus complètes car Boltzmann ne mentionne pas de dépendance en température). Avec d'autres lectures (celles de Jules Violle, William Thomson, Mach, Meyer, Ostwald, etc.), elle a été à l'origine des travaux qui, d'octobre à décembre, l'ont conduit à son premier article aux *Annalen* [10]. Il est probable, qu'occupé par ses idées sur la recherche d'une expression générale des forces moléculaires, Albert n'a alors pas prêté attention au chapitre III consacré à la mécanique analytique de Liouville et à la distribution ergodique (sections 25 à 35),¹⁴ ainsi qu'au

¹⁴ Boltzmann démontre et discute le théorème de Liouville qui énonce l'invariance au cours du temps du volume élémentaire $dpdq$ de l'espace de phase (sections 26-30). À la section 31, il précise ce que devient ce volume élémentaire quand l'énergie totale E est fixée afin de définir (section 32) la «*Distribution ergodique*», répartition uniforme des états du gaz dans l'espace de phase ainsi réduit.

chapitre IV (sections 36 à 47) intitulé *Gaz à molécules composées* où Boltzmann développe les applications de la loi d'équilibre exponentielle e^{-2hc} , appelée aujourd'hui la loi de Boltzmann. Dans cette loi, ε est l'énergie du système considéré, par exemple une molécule ou un ensemble en interaction éventuellement soumis à des forces extérieures, et h est relié à la température.¹⁵ C'est entre ces deux chapitres, comme on le discute plus bas, qu'Albert verra un gap qu'il jugera nécessaire de combler (bien que Boltzmann fasse explicitement un lien entre les deux aux sections 34 et 35). Par contre le chapitre V *L'équation de Van der Waals déduite de la notion de viriel* a dû fortement l'intéresser en avril 1901 car Reinganum, qui dans le *Festschrift* faisait fi des dimensions moléculaires, s'appuyait lui aussi sur la notion de viriel pour obtenir l'équation d'état des gaz. On trouve même à la suite de la section 53 *Viriel des forces de cohésion de Van der Waals* une remarque de Boltzmann qui a contribué à la défiance initiale d'Albert Einstein vis-à-vis de ces dimensions.¹⁶ On a vu (cf. section 1) que le 4 avril Albert discute avec Michele Besso non seulement des forces moléculaires mais aussi «*de la dissociation*». Or, *Théorie de la dissociation* est le titre du chapitre VI (sections 62 à 73) du tome 2. Pour Boltzmann dans ce chapitre (comme pour Jacobus Henricus van't Hoff), la liaison chimique est décrite de façon continue par une énergie d'interaction proportionnelle aux recouvrements de «*domaines [orientés] relativement petits situés sur la surface des atomes*». Il retrouve en particulier les formules d'équilibre chimique de la dissociation d'une molécule diatomique en calculant «*la probabilité [introduite au chapitre IV] pour que l'atome considéré soit, d'une façon générale lié à un autre*»; puis il discute l'influence de la pression et de la température et relie la constante

¹⁵ La relation entre h et la température T des gaz parfaits est obtenue par Boltzmann en calculant l'énergie cinétique moyenne des molécules (ou dans une note en calculant l'énergie de vibration moyenne dans les solides avec référence à la loi de Dulong et Petit sur les capacités calorifiques). Aujourd'hui l'exponentielle est écrite $e^{-\varepsilon/kT}$ où la constante k introduite par Planck en 1901 en l'honneur de Boltzmann est reliée à la constante des gaz parfaits R et au nombre d'Avogadro N_A par $k=R/N_A$.

¹⁶ Le viriel est la somme étendue aux molécules des produits scalaires des vecteurs position et force subie (force d'interaction et force modélisant la collision). Avec la loi de Boltzmann, il permet de remonter à l'équation d'état. À la section 54, le souci de rendre cette équation plus générale amène Boltzmann à envisager une dépendance *ad hoc* des températures avec les dimensions moléculaires, ce qui montre effectivement la limite de l'intérêt d'une telle notion.

d'équilibre à la «*chaleur de dissociation*». Ce qui provoque la discussion avec Michele doit être la section 72 *Rapport de cette théorie avec la théorie de Gibbs* où Boltzmann fait référence au livre de Gibbs traduit par Ostwald [35], ainsi qu'aux articles de Planck en 1887 à la base de son ouvrage de 1897 [31] où la dissociation (comme les solutions diluées) est aussi largement traitée. Boltzmann rappelle que pour Gibbs, «*dans un gaz dissocié, toutes les parties constituantes [la molécule et les atomes séparés] se comportent de façon indépendante comme des gaz isolés et que leurs énergies, leurs entropies, leurs pressions etc. s'ajoutent*», alors que «*au point de vue moderne que Mach et Ostwald ont développé avec beaucoup de sagacité, on estime que, dans la combinaison chimique, quelque chose de complètement nouveau est simplement venu se substituer aux particules constituantes*». Albert doit avoir été perturbé par cet abandon des particules constituantes (pour des complexes intermédiaires) qui n'est pas dans l'esprit de la vision atomiste habituelle de Boltzmann.¹⁷ À la fin du chapitre, après avoir examiné et rejeté la possibilité de considérer les équilibres gaz-liquide à l'aide d'un modèle analogue à la dissociation (avec des atomes ponctuels et autour de chacun un feuillet sphérique siège d'une attraction forte), Boltzmann conclut par un constat qui a pu constituer pour le jeune Einstein un défi à relever dans sa thèse: «*une représentation mécanique simplement basée sur des forces d'attraction ne faisant pas intervenir les forces de percussion des chocs élastiques, et concordant de toutes pièces avec les faits pour les états fluides, gazeux ou liquides, n'est donc pas encore trouvée*».

À la fin du chapitre III, pour établir un lien avec le chapitre IV, Boltzmann fait à la section 34 un calcul hautement non trivial de 4 pages impliquant les fonctions eulériennes, le genre de calculs qu'il affectionne, mais qui, étant non pédagogique, a certainement échappé à Albert. Boltzmann considère un gaz pour lequel l'énergie cinétique totale L est une forme quadratique quelconque dans les vitesses et

¹⁷ Il est paradoxal que Boltzmann se déclare apparemment aux côtés d'Ostwald et de Mach et pas à celui de Gibbs à qui il a emprunté l'épigraphe du tome 2. Pourtant, dans un article de 1883 sur les équilibres chimiques, Boltzmann en fait une présentation statistique qui conduit aux mêmes résultats que l'analyse thermodynamique avec les potentiels chimiques de Gibbs ([32], pp. 258-268). Cela a contribué pour Albert à penser, comme Niels Bohr plus tard qui lui aussi ne connaissait de Boltzmann que ses *Lectures sur la théorie des gaz*, que «*Boltzmann a gâché [spoiled] les choses en insistant sur les propriétés des systèmes mécaniques*» ([29], p. 141).

l'énergie potentielle V ne dépend que des coordonnées. Il montre alors que pour chaque «*momentoïde*» (les «*momentoïdes*», au nombre de μ étant les variables qui diagonalisent L), et dans la limite μ grand (appelée aujourd'hui limite thermodynamique), la loi de probabilité est celle de Maxwell avec une énergie moyenne équirépartie $(E - \bar{V})/\mu$ (E énergie totale fixée et \bar{V} énergie potentielle moyenne). Dans son esprit, il a illustré ainsi le lien existant entre les distributions ergodiques (pour le système total) et celles associées à une température fixée (pour un sous-système).¹⁸ Une discussion physique (section 35), sans calculs, qui n'a pas dû satisfaire Albert, suggère la généralité de ce lien et l'égalité des moyennes temporelles et thermiques. Enfin, au dernier chapitre du tome 2 (sections 74 à 93) qu'Albert n'a pas dû lire avant l'été 1901, Boltzmann revient sur ces questions. Il rappelle en introduction que l'unicité de la distribution de Maxwell a été établie au chapitre I du tome 1 (voir note 5), et, concernant la loi exponentielle du chapitre IV, ajoute que «*nous n'avons pas encore jusqu'à présent démontré complètement, d'une façon tout à fait générale, que ce soit la seule [stationnaire]*». Ceci a dû conforter Albert, quand il l'a lu, dans l'existence d'un gap entre les chapitres III et IV, d'autant plus qu'il n'aurait pas vu l'intérêt des calculs de la section 34 et qu'ensuite, dans le chapitre VII, Boltzmann ne fait qu'étendre aux «*molécules complexes*» la notion de collision faisant passer d'un état moléculaire à un autre, afin de généraliser le théorème H . Même si les remarques faites par Boltzmann à la fin du chapitre sur *Les états [initiaux] organisés non probables* (section 87), *Le temps de retour à un ancien état* (section 88), *La relation avec le deuxième principe* (section 89), *La validité du calcul des probabilités en physique moléculaire* (section 90) en relation avec «*la célèbre méthode de*

¹⁸ Il aurait été beaucoup plus simple que son ensemble ergodique soit purement cinétique avec une énergie quadratique dans les moments. Alors, par un argument dimensionnel, le volume dans l'espace de phase correspondant à une énergie inférieure à E est proportionnel à $E^{\mu/2}$ (comme une sphère de rayon $E^{1/2}$ dans l'espace des μ -moments), et le volume de l'espace de phase pour E fixé est proportionnel à $E^{(\mu-1)}$ (la surface de la sphère) qui pour μ grand ($\mu \simeq 10^{18}$ pour 10^{-9} mole) est assimilable à $E^{\mu/2}$. (Dans un espace à très grande dimension, tout le volume d'une sphère est concentré sur sa surface!). Si l'un des μ degrés de liberté a l'énergie ε , l'énergie restante pour les autres est $E - \varepsilon$, le volume associé est proportionnel à $(E - \varepsilon)^{\mu/2}$ et la probabilité relative des états d'énergie est proportionnelle à $(1 - \varepsilon/E)^{\mu/2}$ ou aussi (en prenant son logarithme) à $e^{-\mu\varepsilon/2E}$ (loi de Maxwell avec l'énergie moyenne E/μ).

calcul des erreurs de Gauss» et le «renversement de la suite des temps», sont toutes des remarques essentielles, elles ne sont pas accompagnées de calculs répondant au problème qu'il a lui-même soulevé en introduction du chapitre. On comprend qu'à la suite de la lecture du tome 2, Albert déclare au début de son premier article de physique statistique: "Great as the achievements of the kinetic theory of heat have been in the domain of gas theory [...] one has not yet succeeded in deriving the laws of thermal equilibrium and the second law of thermodynamics using only the equation of mechanics and the probability calculus, though Maxwell and Boltzmann's theories came close to this goal. The purpose of the following considerations is to close this gap" [7].

Quand en 1902, dans un contexte difficile rappelé plus haut, Albert Einstein se tourne vers la physique statistique, il est un étudiant cherchant à mettre au clair ce qu'il avait lu dans les *Leçons sur la théorie des gaz*, notamment le lien entre les distributions à énergie et température fixée et leur rapport à l'entropie et l'irréversibilité. Il aura besoin pour cela de trois articles,¹⁹ chacun corrigeant en partie et complétant le précédent, avec comme on le verra à la section 5, les quanta à la clé ! Ces articles ont été beaucoup commentés dans la littérature,²⁰ malheu-

¹⁹ Les références à Boltzmann (toutes dans le premier article) concernent les chapitres III et IV du tome 2 (sections 32, 33, 34, 37 et 42) comme attendu. Au début du premier article, Albert fait une démonstration, pour le moins incomplète, du lien entre ces distributions. Elle revient à imaginer un système S caractérisé par une distribution $e^{-2b\epsilon}$ (il admet donc ce résultat) et un système Σ jouant le rôle de réservoir caractérisé par la distribution e^{-2bH} . Il suppose $H+\epsilon=E$ fixé (distribution ergodique pour $S+\Sigma$) et ϵ infiniment petit devant E . Albert établit la relation $2b=\omega'(E)/\omega(E) = 1/2KT$ où $\omega(E)$ est le volume de l'espace de phase de Σ , le lien de b à la température étant obtenu comme à la note 15. Il fait l'hypothèse fautive et non nécessaire aux calculs que S et Σ ont le même nombre de degrés de liberté ; elle est corrigée (avec les mêmes calculs) dans le deuxième article. Le troisième commence avec l'observation que $dS=dE/T$ donne l'entropie $S(E)=2K\ln\omega(E)$. Aujourd'hui on prend comme Boltzmann cette relation comme définition de l'entropie. La probabilité pour le système S d'avoir l'énergie ϵ est alors comme $\omega(E-\epsilon)/\omega(E)=e^{-\epsilon/2KT}$ compte tenu de la définition de dS . Cette démarche est plus claire que les considérations du jeune Einstein, qui n'est pas en 1902 l'expert qu'il deviendra par la suite.

²⁰ Voir par exemple [36, 37, 38, 39]. L'article de J. Renn [28] discute en détail «l'impression d'Einstein qu'il y a en effet un manque [gap] dans la théorie des gaz» et montre que le contenu des articles d'Einstein est déjà dans les travaux de Boltzmann. Renn considère aussi que sa polémique avec Drude sur la théorie des électrons (cf. note 8) serait le déclencheur des réflexions d'Einstein sur la physique statistique.

reusement souvent en prenant l'étudiant Albert, avide de comprendre la science contemporaine, pour le savant Einstein formalisant une nouvelle discipline. Einstein reconnaîtra lui-même en 1911, en conclusion de sa réponse dans les *Annalen* à la critique de Paul Herz à leur égard: «Si j'avais été familier avec le livre de Gibbs à cette époque, je n'aurais aucunement publié ces articles, et je me serais limité au traitement de quelques points» [40].²¹ Ce n'est pas l'objet ici de refaire une analyse de ces articles, ni même, ce qui serait intéressant, de les comparer en détail au contenu des *Leçons* de Boltzmann et des nombreuses références de l'auteur à des travaux antérieurs.²² Nous nous contentons de faire remarquer que la lecture du livre de thermodynamique de Planck de 1897 (qu'Einstein a déjà pu consulter à propos de la dissociation et dont il parle avec intérêt à Mileva début novembre 1901) a certainement contribué à l'esprit de ces articles. En effet, des concepts classiques de thermodynamique comme la distinction travail-chaleur, la définition de l'entropie par $\delta S = \delta Q/T$ pour une transformation réversible, le lien de l'entropie au potentiel $F = U - TS$, l'importance chère à Planck des fluctuations thermodynamiques, figurent tous en bonne place dans ces trois articles. Cette approche, faisant contrepoids à celle plus théorique et abstraite de Boltzmann a sûrement plu au comité de rédaction des *Annalen*, qui avait en Planck son principal représentant. En 1905, Albert Einstein sera appelé au comité de rédaction des *Beiblätter zu den Annalen der Physik* et réfèrera 8 articles de thermodynamique avant l'envoi de son article sur les quanta en mars, puis 6 autres avant de soumettre celui sur la relativité en juin (dont des articles de van't Hoff, Bryan et Planck).

²¹ Le livre de Gibbs [33] sort au début de l'année 1902. Même si le 19 septembre 1901 Albert fait part dans sa lettre à Grossmann de premiers calculs éclaircissant Boltzmann (probablement liés au début du premier article de juin 1902) il serait étonnant que jusqu'en 1904 il n'ait pas eu une connaissance même superficielle de ce livre, y compris à travers les retours du comité de rédaction des *Annalen*. On a vu en tout cas que Planck, en juillet 1903, connaissait bien ce livre (dont il avait fait l'analyse détaillée, la même année, pour les *Beiblätter*).

²² Dans le tome 2, Boltzmann donne en note près de 40 références à ses propres travaux. Les éditeurs des *Collected Papers of Albert Einstein* vol. 2 [CPAE 2] (*cf.* référence [1]) n'excluent pas qu'Einstein ait pu en consulter quelques-unes.

4. «LA SÉPARATION ESSENTIELLE DE L'ÉTHER LUMINEUX ET DE LA MATIÈRE» ET LA RELATIVITÉ (1898-1905)

À la fin du XIXe siècle, l'éther qui avait été introduit comme milieu de propagation de la lumière devient, pour les physiciens, partie prenante de l'électromagnétisme. Albert Einstein s'est certainement lui aussi posé la question de sa nature quand il rédige, à l'âge de 16 ans, un court article sur *L'état de l'éther dans un champ magnétique*, où il discute l'influence du champ sur la vitesse de la lumière et envisage un lien avec la nature du courant électrique ([13], chapitre IV). Celle, plus philosophique, de l'existence même de l'éther lui est peut-être venue vers 1897-1898 par le livre de mécanique de Mach [41], conseillé par Michele, dans lequel l'auteur écrit que cette «*conception est d'une valeur infiniment plus grande que l'idée surannée d'un espace absolu*». En 1897-1898 Albert est dans sa deuxième année d'études à l'ETH et suit au second semestre les cours d'électromagnétisme de Weber. Ces cours ne discutent pas les théories les plus récentes et, pour les compléter, il lit notamment, comme en témoignent deux lettres à Mileva postérieures au 16 avril 1898, la *Physique de l'éther sur des bases électromagnétiques* de Drude [42], qui est le premier ouvrage d'un auteur allemand présentant la théorie de Maxwell.²³ C'est à l'été 1899 qu'Albert se pose la question du mouvement relatif de l'éther par rapport à la matière qui, dans la littérature contemporaine, fait référence à l'hypothèse d'Augustin Fresnel d'un entraînement partiel de l'éther par la Terre dans son mouvement.²⁴ Fait unique dans l'ensemble des lettres à

²³ La première édition de *Électricité et Optique* de Poincaré, en deux volumes (1890 et 1891), qui reproduisait ses cours à la Sorbonne, avait été traduite auparavant en allemand par les assistants de Helmholtz à Berlin en 1891 et 1892. La revue pour ingénieurs électriciens *Elektrotechnische Zeitschrift* de 1891 faisait un commentaire élogieux du premier volume où étaient exposées les théories de Maxwell et de Helmholtz, se concluant par «*Il faut ainsi recommander instamment l'ouvrage à tout physicien*». Poincaré est aussi mentionné (avec Boltzmann) à plusieurs reprises, pour ses cours, dans la préface de l'édition originale du livre de Drude de 1894.

²⁴ En 1818, Fresnel introduit cette thématique pour expliquer l'absence de déplacement du spectre d'une étoile observée par un télescope à différents moments de la nuit ou à différentes périodes de l'année (prisme d'Arago). Ce qui est alors en jeu est la valeur par rapport à l'éther de la vitesse de la lumière de l'étoile dans le prisme en mouvement. Il faut qu'elle ait une expression particulière pour expliquer que l'effet

Mileva, Albert fait début août une très longue suite de remarques scientifiques en rapport avec ce sujet (26 lignes). Elles commencent par: «*J'étudie une nouvelle fois avec la plus grande attention la propagation de la force électrique de Hertz*». Il a déjà consulté ce livre mais n'a pas encore travaillé la partie mathématiquement difficile consacrée à l'électrodynamique des corps en mouvement où l'éther est supposé totalement entraîné par la matière.²⁵ Il poursuit: «*Je suis de plus en plus convaincu que l'électrodynamique des corps en mouvement, telle qu'elle se présente actuellement, ne correspond pas à la réalité, et qu'il doit être possible de la présenter de façon plus simple. L'introduction du mot «éther» dans les théories de l'électricité a conduit à l'idée d'un «milieu» du mouvement duquel il est possible de parler, sans que l'on soit capable, à mon avis, d'associer une signification précise à ce que l'on dit. Je crois que les forces électriques ne peuvent être définies directement que dans un espace vide, ce que Hertz souligne également*» ([17], L. 8). Puis Albert mentionne deux conceptions différentes de l'électricité; celle de Hertz selon laquelle l'électricité n'est qu'une propriété mathématique associée à la polarisation de la matière (et donc entraînée par elle) et celle selon laquelle «*il faudra considérer les courants électriques [...] comme un mouvement de masses électriques vraies dont les équivalents chimiques semblent prouver l'existence*». Il fait alors le lien avec la lumière et a probablement en tête une idée d'expérience:²⁶ «*Les recherches sur le rayonnement indiqueront laquelle de ces deux conceptions doit être choisie. Au fait, je n'ai eu jusqu'à maintenant aucune nouvelle du recteur Wüst. Je*

d'aberration la compense exactement [43,44]. Cette vitesse doit être $c/n+V(1-1/n^2)$ où V est la vitesse de la Terre, c celle de la lumière dans le vide et n l'indice de réfraction du prisme. Elle a été vérifiée en 1851 par Hippolyte Fizeau. Elle serait c/n en l'absence d'entraînement de l'éther et $c/n+V$ pour un entraînement total (loi bien connue d'addition des vitesses). Elle explique aux yeux de Fresnel «*que le mouvement de notre globe ne doit avoir aucune influence sensible sur la réfraction apparente*» (invariance des lois de l'optique géométrique !).

²⁵ À propos de son retour à Hertz, Einstein écrit aussi: «*J'y ai été amené par le fait que je n'ai pas compris le mémoire de Helmholtz sur le principe de moindre action en électrodynamique*». Ce mémoire encore plus technique prend pour variables des circulations et flux élémentaires de champs qui suivent la matière.

²⁶ Einstein semble ignorer qu'avec la description de la polarisation diélectrique en termes de charges susceptibles de se déplacer, Lorentz a pu expliquer dès 1892 l'entraînement partiel de Fresnel.

vais lui écrire très prochainement». ²⁷ Ces propos très riches, bien qu'un peu allusifs, lui sont certainement venus d'une lecture antérieure de l'article de Wilhelm Wien *Sur les questions relatives au mouvement de translation de l'éther lumineux* [46] cité fin septembre dans la lettre ([17], L. 11). Comme cet article a joué un rôle important pour Einstein, il convient d'en résumer succinctement le contenu. Wien rappelle d'abord la dernière théorie de Helmholtz où l'auteur écrit une équation hydrodynamique pour le vecteur de Poynting associé au courant d'énergie. On comprend alors que début août (avant d'aborder Hertz), Albert disait à Mileva avoir «*bien avancé dans l'étude des mouvements atmosphériques par Helmholtz*»; en effet Helmholtz envisageait que, dans son mouvement, l'éther avait (comme l'air) une inertie négligeable. En prenant en particulier l'exemple d'une charge en mouvement uniforme, Wien montre l'existence d'une vitesse de l'éther et mentionne une expérience, infructueuse, destinée à mettre en évidence l'entraînement de l'éther par des rayons cathodiques, à l'aide d'un réfractomètre de Jamin (une expérience probablement de même nature que celle envisagée par Albert à Arau). Mais le plus important dans l'article de Wien concerne sa discussion de l'hypothèse de Lorentz d'un éther au repos, dont les seules propriétés sont désormais d'être porteur des champs agissant sur des charges libres de se déplacer (sans être soumis à des forces de leur part), et l'introduction par Lorentz du «*temps local*» dont il donne l'expression mathématique $t' = t - Vx/c^2$. ²⁸ Cette trans-

²⁷ Selon les éditeurs des CPAE 1 (cf. référence [17]), Albert Einstein projetait une expérience impliquant des rayons cathodiques avec le directeur de l'École cantonale de Arau où il a été élève en 1895-1896. Il écrit aussi à Mileva: «*À Arau il m'est venu une idée intéressante pour étudier quelle influence le mouvement relatif des corps par rapport à l'éther lumineux peut exercer sur la vitesse de la propagation de la lumière dans les corps transparents. À ce sujet j'ai pensé à une théorie qui me semble tout-à-fait plausible*» ([17], L. 10). Peut-être s'agirait-il d'une correction à Hertz, qu'il est en train de lire, pour expliquer l'expérience de Fizeau (comme Poincaré, sans y croire, l'avait tenté dans l'*Éclairage Électrique* de 1895 [45]).

²⁸ Dans son *Versuch* de 1895 [47], pour étudier les diélectriques en mouvement, Lorentz introduit son «*principe des états correspondants*». Soit un système physique au repos dans l'éther composé de charges électriques microscopiques mobiles (de densité ρ) et mettons-le globalement en mouvement à la vitesse V . Lorentz s'intéresse aux variables cinématiques x', t' et de champs, $\vec{E}^{\prime}, \vec{B}^{\prime}$ permettant de ramener son étude à celle du système au repos (mêmes équations de Maxwell au premier ordre en V/c avec les variables primes). Ce principe, ancêtre du principe de relativité, rend ainsi compte du fait qu'un

formation accompagne celle, bien connue, $x'=x-Vt$ dans un changement de référentiel galiléen. Elle explique notamment la formule de Fresnel de manière très simple en supposant l'invariance de la phase d'une onde plane. Wien fait enfin état du succès de la théorie de Lorentz et discute à sa lumière les résultats de treize expériences d'optique et d'électromagnétisme avec des corps en mouvement. Il signale entre autres que l'introduction du temps local explique aussi l'aberration des étoiles dans le cadre ondulatoire (transformation du vecteur d'onde). Wien voit cependant deux limites à la théorie: celle de ne pas obéir au principe de l'action et de la réaction et celle d'être limitée à l'ordre V/c insuffisant pour rendre compte sans hypothèse additionnelle du résultat négatif de l'expérience d'Albert Abraham Michelson à l'ordre V^2/c^2 .

«Comme je serai heureux et fier, lorsque tous les deux ensemble nous aurons mené à bien notre travail sur le mouvement relatif» ([17], L. 25). Cette phrase est celle qu'Albert Einstein adresse à Mileva le 27 mars 1901, un an et demi après la lecture de Wien. Le printemps 1901 est pour lui à Milan, une période d'intense activité pendant laquelle, on l'a vu, il réoriente sa thèse sur les forces moléculaires avec l'article de Reinganum dans le *Festschrift* pour Lorentz, et comme on le verra à la section 5, où il lit Planck et s'intéresse au rayonnement. Parmi les articles du *Festschrift*, il y a l'article remarquable de Poincaré sur *La théorie de Lorentz et le principe de réaction* [48]. Gustav Mie lui consacre un long résumé en mai dans les *Beiblätter zu den Annalen der Physik* [49]. Max Abraham l'utilisera dès 1902 pour sa réduction de la mécanique à l'électrodynamique. Einstein y reviendra lui-même, en s'y référant, en 1906 [50]. C'est probablement suite à la lecture de cet article de Poincaré que l'on doit une remarque importante d'Albert à Mileva, le 4 avril. À propos de Michele, il rapporte: «Nous avons discuté de la séparation essentielle de l'éther lumineux et de la matière, de la définition du repos absolu». Notons que cette phrase sous-entend en particulier que la question d'un rôle mécanique de l'éther n'aurait peut-être

observateur terrestre ne peut en aucune manière, par des expériences électromagnétiques, mettre en évidence au premier ordre en V/c son mouvement par rapport à l'éther. Mais Lorentz considère le temps local («*Ortzeit*») comme une variable «*fictive*» et ne songe aucunement à un temps mesuré par des horloges en mouvement. Il donne de même des lois de transformations pour les champs $\vec{E}^1 = \vec{E} + \vec{V} \wedge \vec{B}$ et $\vec{B}^1 = \vec{B} - \vec{V} \wedge \vec{E} / c^2$.

plus de sens, de même que celle du repos qui lui est associé. Que contient cet article qui ait pu intéresser Albert?

Poincaré montre d'abord qu'à partir des équations de Maxwell-Lorentz que la quantité de mouvement du système {champ électromagnétique – matière} est conservée si on attribue au champ une densité de quantité de mouvement $\vec{E} \wedge \vec{B}$ ($B=E/c$ pour une onde électromagnétique plane). La loi de l'action et de la réaction est donc satisfaite pour ce système et l'éther ne joue plus de rôle mécanique. Ensuite, en comparant très simplement (sans équation de champ) les théories de Lorentz et de Hertz, Poincaré explique que la théorie de Hertz est contraire à l'expérience de Fizeau (qu'Albert connaît depuis au moins septembre 1899), et qu'elle prédit que si une émission directionnelle de rayonnement se fait dans un milieu, c'est le milieu seul qui compense le recul de l'émetteur. Ce sont tous les espoirs d'Albert de 1899 dans la théorie de Hertz qui s'effondrent (s'il en avait encore) au profit de la théorie de Lorentz. Mais l'article de Poincaré contient aussi l'interprétation du temps local de Lorentz, point qui n'avait été relevé ni par Mie, ni par Abraham [13]. Poincaré donne un sens physique au temps local sur la base d'un processus de synchronisation et de l'invariance de la vitesse de la lumière: «Je suppose que des observateurs placés en différents points, règlent leurs montres à l'aide de signaux lumineux; qu'ils cherchent à corriger ces signaux du temps de la transmission, mais qu'ignorant le mouvement de translation dont ils sont animés et croyant par conséquent que les signaux se transmettent également vite dans les deux sens, ils se bornent à croiser les observations, en envoyant un signal de A en B, puis un autre de B en A. Le temps local est le temps marqué par les montres ainsi réglées».²⁹ La variable fictive devient ainsi un véritable temps. Cette expérience de pensée de Poincaré est analogue à celle d'Einstein de juin 1905 comme on le verra à la fin de cette section. Enfin, l'article de Poincaré du *Festschrift* contient une autre expérience de pensée, proche elle aussi [51], de celle qu'envisagera Einstein en

²⁹ En effet, si un signal lumineux émis par A est reçu par B distant de l à l'instant $t'=l/c$ (pour lui), alors dans le référentiel R, où B fuit le signal à la vitesse V , une horloge au repos marque le temps $t=l/(c-V)$ à cette réception. Cela conduit immédiatement à la relation $t'=t-Vx/c^2$. En toute rigueur, les temps de propagation de A vers B et B vers A valent $\Delta t_{\pm}=l/(c \mp V)$ dans R avec $\Delta(x-Vt)_{\pm}=\pm l$ et sont égaux dans R'. Si on pose $t'=at+b(x-Vt)$, un calcul élémentaire conduit à $t'=a\left(t-\frac{V}{c^2-V^2}(x-Vt)\right)$. Au premier ordre en V/c , et sachant que $t'=t$ si $V=0$, on retrouve le temps local de Lorentz de 1895.

septembre 1905 [5]. Un oscillateur hertzien en mouvement dans l'éther émet un train d'onde lumineux de longueur L . Poincaré s'intéresse au recul de l'émetteur dans ce référentiel R et dans un autre R' . À partir des transformations de Lorentz de 1895 pour les coordonnées, il obtient la longueur $L'=(1+V/c)L$ dans R' , puis à partir des transformations des champs, il obtient l'énergie du train d'onde $E'=(1-V/c)E$ dans R' .³⁰ Comme la quantité de mouvement du train d'ondes est reliée à son énergie par $p=E/c$, Poincaré fait remarquer que le recul de l'émetteur E/c dans R diffère de celui dans R' ce qui est contraire à l'invariance des forces en Mécanique dans un changement de référentiel galiléen. Sa remarque porte en germe l'inertie de l'énergie. Si m est la masse de l'émetteur, les bilans de quantité de mouvement dans R et dans R' sont respectivement $\Delta(mv) = -E/c$ et $\Delta(m(v-V)) = -E'/c$, et ils impliquent $\Delta m = -E/c^2$, E étant l'énergie emportée par le rayonnement, et donc perdue par l'émetteur. Mais Poincaré l'interprète alors comme la force supplémentaire de Liénard. En 1906 [50], Einstein s'intéressera, comme Poincaré en 1900, à la conservation du mouvement du centre de masse d'un système matériel émettant et absorbant de l'énergie, et corrigera Poincaré à la lumière de son article de septembre 1905, où il a introduit l'inertie de toute forme d'énergie $\Delta E = (\Delta m)c^2$ [5].

À Kyoto en 1922, alors qu'il s'exprime en conférence sur ses premières idées sur la relativité, Einstein fait mention – pour la seule et unique fois – d'une expérience qu'il avait envisagée avant 1905. Il ne donne pas de date, mais nous allons voir qu'il s'agit de la période sep-

³⁰ Arthur Miller note à ce propos que «Poincaré a été le premier à obtenir [to deduce] la loi de transformation d'une impulsion lumineuse» [52]. Comme l'effet Doppler pour la fréquence donne $v'=(1-V/c)v$, une conséquence implicite des calculs de Poincaré est que E se transforme comme v au premier ordre en V/c . Poincaré ne commente pas ce résultat, mais pour lui l'invariance de E/v ne doit pas être étonnante ; elle est en effet une conséquence du théorème adiabatique dont il parle dans ses cours de *Thermodynamique* [53]. On sait à quel point cette invariance a été importante pour Einstein qui la généralise à tout ordre en 1905: «Il est digne de noter que l'énergie et la fréquence d'un complexe lumineux se transforment selon la même loi» [4] («un des grands euphémismes [understatements] de l'histoire des sciences» d'après Miller [54]). En effet, cette invariance prend tout son sens quand on la rapproche des quanta d'énergie introduits par Planck le 15 décembre 1900 devant l'académie à Berlin. D'un point de vue rétrospectif, il est remarquable que l'article de Poincaré et la communication de Planck se fassent à quatre jours près (le 11 décembre pour le *Festschrift*) !

tembre – décembre 1901, entre Milan et Schaffhouse. Il rappelle: «*Je souhaitais alors vérifier moi-même le flot d'éther par rapport à la Terre. La première fois que j'ai pensé à ce problème, je ne doutais pas de l'existence de l'éther ou du mouvement de la Terre à travers lui. J'ai pensé à l'expérience suivante utilisant deux thermocouples: plaçons des miroirs de sorte que la lumière d'une source unique soit réfléchié dans deux directions, l'une parallèle au mouvement de la Terre et l'autre antiparallèle. Si l'on suppose qu'il y a une différence d'énergie dans les deux faisceaux réfléchis, on peut mesurer la différence dans la chaleur produite en utilisant deux thermocouples. Bien que cette expérience soit très similaire à celle de Michelson, je ne l'ai pas réalisée*» [55]. Or en septembre 1901, toujours de Milan, Einstein s'ouvrait déjà à son ami Marcel Grossmann d'une idée d'expérience: «*Une méthode considérablement plus simple pour mettre en évidence le mouvement relatif de la matière par rapport à l'éther lumineux, qui est basée sur les expériences ordinaires d'interférences m'est soudain venue à l'esprit*» (voir CPAE 1, pp. 290-291). Le sujet réapparaît dans les lettres à Mileva, le 17 décembre. Albert lui écrit: «*Je travaille d'arrache-pied à une électrodynamique des corps en mouvement qui promet de devenir un article capital*». Parlant de Kleiner (son directeur de thèse), il ajoute: «*Je veux absolument l'amener à me laisser travailler pendant les vacances de Noël*» ([17], L. 46). Deux jours plus tard, il expose ses idées à Kleiner et fait part à Mileva de la satisfaction de son directeur pour son travail: «*Il m'a conseillé de publier mes idées sur la théorie électromagnétique des corps en mouvement, méthode expérimentale y compris. Il a trouvé que la méthode expérimentale que je propose est la plus appropriée et la plus simple que l'on puisse imaginer. J'étais très content de mon succès. Je compte bien rédiger mon article dans les semaines qui viennent*». Albert sait pouvoir bénéficier à Zurich de laboratoires de pointe en physique et il connaît bien les thermocouples (thermopiles).³¹ Tenter cette expérience, en lien avec l'article «*capital*» sur le «*mouvement relatif*», aurait pu être son objectif pendant les vacances de Noël. Quant aux calculs précis sur lesquels est basée cette

³¹ Les thermocouples reposent sur l'apparition d'une tension entre les extrémités d'une jonction de deux métaux différents portées à des températures différentes. En assemblant plusieurs centaines de thermocouples en série, on obtient une *thermopile* (Leopoldo Nobili), dont la tension est mesurable par des appareils très sensibles. Cette dernière a été popularisée par Macedonio Melloni et figure alors dans tout catalogue de matériel de laboratoire pour la mesure de rayonnement infrarouge.

expérience, on ne le saura jamais. Mais ils sont assurément en lien avec la théorie de Lorentz de 1895 car le 28 décembre, Einstein écrit à Mileva qu'il a «*maintenant l'intention d'étudier ce que Lorentz et Drude ont écrit sur l'électrodynamique des corps en mouvement. C'est Ebrat qui doit me faire parvenir les livres*» ([17], L. 48). On peut même penser qu'ils sont liés aux calculs sur la transformation des grandeurs énergétiques en électromagnétisme, comme le fait par exemple Liénard dans *L'éclairage électrique*, une revue lue par les ingénieurs électriciens, ou Poincaré dans la seconde édition de *Électricité et optique* [56].³² En particulier dans le chapitre VI où il établit l'équivalence des équations dans l'éther et dans un référentiel en mouvement (voir note 32), Poincaré ajoute la remarque suivante: «*On pourrait faire une objection à la conclusion que nous venons de faire: on pourrait dire que si la position des franges n'est pas modifiée, il ne résulte pas de là que leur intensité ne le soit pas; et si l'on pouvait mesurer cette variation d'intensité on aurait un moyen pour déceler le mouvement de la terre par des phénomènes optiques. Mais nous allons voir qu'il n'en est rien: il y a impossibilité matérielle de mesurer une pareille variation d'intensité*». Cette affirmation (étonnante) a pu être vue comme un défi à relever pour un jeune étudiant comme Albert travaillant sur le sujet. L'effet relatif en V/c vaut 2×10^{-4} et ne peut donc pas être détecté par des plaques photographiques. Mais comme il pourrait l'être par des thermopiles, Einstein peut avoir pensé à une expérience mettant quand même en évidence le mouvement relatif de la Terre. On comprend ainsi rétrospectivement mieux le contenu de la lettre à Grossmann (et les «*fausses pistes*» évoquées par Besso, voir section 1).

Il semble donc que fin 1901, Albert Einstein pense encore au mouvement relatif de l'éther et de la matière et que, comme la presque totalité des physiciens, il n'a pas encore prêté complètement attention

³² Poincaré y expose les théories électrodynamiques récentes avec une attention particulière pour la théorie de Lorentz de 1895. En particulier, il consacre le chapitre VI (516-536) aux *Phénomènes optiques dans un corps en mouvement* et le chapitre VII (537-543) à *L'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes électriques proprement dits*. Il démontre notamment dans le chapitre VI que dans cette théorie les phénomènes optiques ne sont pas modifiés au premier ordre en V/c par le déplacement de la Terre, ce qu'il traduit sous la forme d'un «*théorème*» selon lequel «*Le mouvement de la terre n'influe pas sur les phénomènes optiques si on néglige les carrés de l'aberration [V^2/c^2]*». Ainsi, par exemple, les phénomènes d'interférences sont-ils identiques pour l'observateur terrestre, à cet ordre d'approximation, que la Terre soit en mouvement ou au repos dans l'éther.

au temps local de Lorentz interprété par Poincaré dans le *Festschrift*. Après 1902, dans le cadre de l'*académie Olympia*, qui regroupe autour de lui ses amis Maurice Solovine et Conrad Habicht, Albert a l'occasion d'étudier *La science et l'hypothèse* de Poincaré [57] «un livre qui nous a profondément impressionnés et tenus en haleine pendant de longues semaines» d'après Solovine [58]. Poincaré y écrit au chapitre VI qu'«il n'y a pas de temps absolu» et qu'on ne peut pas parler sans convention préalable de simultanéité «sur des théâtres différents». Albert Einstein ne voit certainement pas encore en 1902 les transformations de Lorentz de 1895 comme une relativité au premier ordre [59].³³ Mais les discussions sur *La science et l'hypothèse* et le souvenir de l'interprétation du temps local par Poincaré en 1900 dans le *Festschrift* vont revenir soudainement au printemps 1905, quand, avec Michele Besso (qu'il remercie, chose exceptionnelle, à la fin de son article de juin) il repense à la notion de temps. La raison, qui nous semble-t-il n'a pas encore été signalée, est que Lorentz a introduit en 1904 une nouvelle expression du temps local qui va être reproduite dans les *Beiblätter* de la seconde quinzaine du mois de février [60]. Or Einstein, comme on l'a vu, est rapporteur dans cette revue et il publie huit notes de lectures dans le numéro de la quinzaine suivante. Il a donc dû prendre connaissance au plus tard en mars 1905 de l'expression:

$$x' = kx ; \quad t' = \frac{t}{k} - \frac{kVx}{c^2} ; \quad k^2 = \frac{c^2}{c^2 - V^2}$$

[lire $(x-Vt)$ à la place de x comme dans Lorentz 1895]. Un indice que l'article de juin 1905 a pour origine la découverte par Einstein de cette formule de Lorentz est que la toute première étape de sa démonstration le conduit à l'expression analogue, la constante a étant déterminée par la suite.³⁴ Cette première étape consiste à examiner l'aller-retour entre deux miroirs d'un faisceau lumineux dans le référentiel des miroirs et dans un référentiel quelconque. Einstein, pour retrouver le temps local

³³ Les transformations de Lorentz de 1895 sont la forme infinitésimale de celles de 1904. Tous les résultats obtenus avec elles concernant l'optique (Fresnel) et l'électromagnétisme (Lorentz, Poincaré) relèvent donc d'une relativité au premier ordre qui sera bien connue d'Einstein en juin 1905 ([4], introduction).

³⁴ Dans l'établissement des transformations de Lorentz à partir de l'invariance de c , aucun livre d'enseignement ne passe plus aujourd'hui par cette première étape.

de 1904, adapte donc la méthode esquissée par Poincaré en 1900 [48] pour retrouver le cas plus simple de 1895 (voir note 29). Comme il le dira en 1907 [61] «*Il suffisait de réaliser qu'une quantité auxiliaire introduite par H. A. Lorentz et appelée par lui temps local pouvait être définie comme le temps en général*». La période mars-avril 1901, avec la lecture du *Festschrift* pour Lorentz à Milan, apparaît de ce point de vue déterminante pour l'article de juin 1905.

5. LES QUANTA SORTIS D'«UN OCÉAN D'OBSCURITÉ» AVANT 1905?

Michele Besso fait remonter, comme nous l'avons vu à la section 2, à 1895 ses premières discussions avec Albert Einstein sur la nature de la lumière «*entre Newton et Huygens*», soit entre particules et ondes. Les lectures d'Albert vers 1897-1898 du livre de Drude sur l'électromagnétisme et l'éther [42], ou des *Wärmelehre* de Mach où sont discutées les propriétés du corps noir, abordées aussi dans son cours par Weber (qui avait expérimenté sur le sujet), l'ont certainement convaincu que la théorie ondulatoire électromagnétique répond totalement aux faits observés. C'est à propos de l'interaction du rayonnement avec la matière que de nouvelles réflexions d'Albert vont s'enchaîner rapidement, au printemps 1901, à Milan, en liaison avec les lectures de Planck, Poincaré et Lenard. Le 23 mars, il fait part à Mileva d'une «*idée originale*» pour relier la chaleur spécifique des corps et leur absorption du rayonnement: «*En effet, il ne me semble pas exclu que l'énergie cinétique latente de la chaleur dans les solides et les liquides puisse être considérée comme de l'énergie électrique de résonateurs. Dans ce cas, la chaleur spécifique et le spectre d'absorption des solides devraient être liés. La loi de Dulong et Petit vaudrait pour les substances dont les plus petites parties présenteraient une certaine résonance totale au sens électro-optique du terme*» ([17], L. 24). Albert donne ensuite des exemples de corps opaques satisfaisant à cette loi et demande à Mileva de lui trouver des informations sur le verre. Dans cet esprit, le 27 mars, il envisage de collecter des données sur les coefficients d'absorption des métaux déduits d'expériences sur la réflexion métallique des ondes.³⁵

³⁵ Dans le *Festschrift*, il y a un article de Dimitrij A. Goldhammer sur la pression du rayonnement où ce sujet est discuté [62].

Dans ces propos, Albert fait état implicitement de connaissances approfondies concernant la théorie de la dispersion, qui rend compte de l'indice et du coefficient d'absorption d'un milieu. Dans cette théorie purement électromagnétique, un dipôle est soumis à la force électrique du rayonnement, ce qui conduit à une polarisation du milieu qui affecte la propagation de la lumière. Dans les corps transparents, la fréquence propre d'oscillation du dipôle est beaucoup plus grande que celle de la lumière et Albert peut penser (comme il le discutera six ans plus tard) que les résonateurs ne participent pas à la chaleur spécifique (car ils ne seraient pas excités). Si les fréquences sont comparables, l'oscillateur entre en résonance, et, comme il possède un coefficient d'amortissement, le milieu absorbe l'énergie lumineuse. *A priori* cette théorie de la dispersion est indépendante de celles introduites en thermodynamique pour rendre compte des chaleurs spécifiques à partir des mouvements moléculaires de translation, de vibration (voire des mouvements mécaniques internes) comme Albert l'a appris chez Weber et Boltzmann. En fait, ces résonateurs sont ceux qu'il a découverts dans le traitement du corps noir par Planck. Comme souvent dans les lettres, ce n'est qu'après leur formulation qu'on s'aperçoit que les idées d'Albert sont liées à des lectures antérieures. Le 4 avril, il fait part à Mileva de «*quelques réserves de principe à propos des études de Max Planck sur le rayonnement, ce qui fait que je lis son traité avec des sentiments mitigés*»; et, deux phrases plus loin, parlant d'«*une étude de Paul Drude sur la théorie des électrons*»: «*Lui aussi suppose que ce sont avant tout des corpuscules électriques négatifs sans masse pondérable qui conditionnent les phénomènes thermiques et électriques dans les métaux*» ([17], L. 26). Or Planck, dans son traitement du corps noir, considère effectivement une limite de masse nulle pour ses oscillateurs, dont il ne précise pas la nature physique.³⁶ Le 10 avril, Albert revient sur Planck:

³⁶ L'approche du corps noir par Planck repose sur la formule $u(\nu) = (8\pi\nu^2/c^3)U$ qui relie la densité spectrale volumique du rayonnement à l'énergie moyenne d'un résonateur de fréquence ν . En partant de l'équation d'un dipôle p oscillant en présence du champ électrique E de la lumière, qu'on peut écrire $m\ddot{p} + f\dot{p} + m\omega_0^2 p = 0$ [63], Planck fait le calcul (très classique) de l'énergie moyenne U de l'oscillateur et de la puissance absorbée. En identifiant cette puissance à celle rayonnée par le dipôle, il obtient le coefficient de friction (analogue à la résistance électrique d'une antenne): $f = (12\varepsilon_0)^{-1} (8\pi\nu_0^2)/c^3$. (C'est à ce calcul qu'il se limite dans le bref article du *Festschrift* pour Lorentz). Pour aborder le corps noir (rayonnement en équilibre thermique), Planck considère un champ E

«Planck suppose qu'une catégorie bien déterminée de résonateurs (de période et d'amortissement bien déterminés) conditionne les transferts de l'énergie du rayonnement – hypothèse que j'ai du mal à faire mienne. Peut-être sa toute dernière théorie est-elle plus générale. J'ai justement l'intention de m'y attaquer» ([17], L. 27). La mention d'un amortissement non nul fait référence à une nouvelle lecture (non citée directement à Mileva), celle de l'article de Planck du *Festchrift* [64] (qu'il consulte comme on l'a vu à cette période à la bibliothèque de l'*Institut lombard*). Albert n'a certainement pas saisi en mars 1901 le rôle des résonateurs de Planck. Il les pense attachés à la matière, d'où leur influence possible sur la chaleur spécifique. Mais dans l'esprit de Planck, ils concernent aussi le rayonnement puisque leur énergie moyenne est reliée à la densité volumique spectrale (voir note 36). Il est remarquable que Planck postule une relation analogue pour les entropies $s(\nu)$ et $S(U)$ du rayonnement et des résonateurs respectivement. Cela le conduit en 1899, à partir de la loi de Wien du rayonnement du corps noir, à donner pour U une expression qui n'est pas kT comme pour un oscillateur mécanique. Planck n'en est pas surpris car il s'agit de la lumière et qu'il connaît beaucoup d'autres exemples observés pour la matière.³⁷ Début 1901, à partir de la loi qui porte son nom, il déduit une nouvelle expression de $S(U)$ et a l'idée de lui appliquer la définition de Boltzmann de l'entropie $S=k \ln W$ pour obtenir et interpréter W . Planck réfère à l'article de Boltzmann de 1877 mentionné par ce dernier dans ses *Leçons sur la théorie des gaz* (voir section 3). C'est ainsi qu'il est conduit à la condition nécessaire de quantification (bien connue) des énergies des résonateurs $\varepsilon_n = nh\nu$.³⁸ C'est «la toute dernière

chaotique (l'analogie pour le rayonnement de l'hypothèse de chaos moléculaire pour les gaz). Il calcule la puissance volumique spectrale absorbée qu'il relie à l'énergie moyenne d'un oscillateur. Dans la relation finale entre $u(\nu)$ et U , la masse m et le coefficient d'amortissement f disparaissent. Mais pour que ce qui est absorbé soit intégralement émis, il faut faire tendre f vers zéro, et donc m aussi puisque le rapport est relié à la largeur spectrale de la raie. Les résonateurs chez Planck sont donc des passeurs d'énergie lumineuse, pas des thermostats! Albert n'a certainement pas saisi cette subtilité du raisonnement de Planck - ce qui sera un des moteurs pour l'inciter à trouver une autre interprétation.

³⁷ Par contre, cela choquera encore Einstein dans son article de mars 1905.

³⁸ Il avait, sans le savoir, découvert que les «thermoéléments» de la lumière ne sont pas des modes classiques du rayonnement (auquel cas on aurait $U=kT$ comme le pensait Jeans en 1900) mais des modes quantiques. Aujourd'hui, encore beaucoup de

théorie» dont parle Albert à Mileva le 10 avril. Elle paraît dans le numéro 4 des *Annalen der Physik* [66], celui qui voit paraître l'article d'Albert sur la capillarité.

Le 10 avril toujours, Albert déclare à Mileva: «*mes intuitions sur la nature du rayonnement ont de nouveau sombré dans un océan d'obscurité. Peut-être l'avenir nous apportera-t-il une solution plus raisonnable*». L'idée de corpuscules lumineux associés à une portion d'onde, dans une vision dualiste de la lumière «*entre Newton et Huygens*», est celle qui l'accompagne probablement depuis 1895. La vision de Planck des quanta, avec des oscillateurs statiques (quels qu'ils soient) ne peut être la sienne. Qu'elle n'a pas dû être sa surprise en lisant dans le *Festchrift* l'article de Poincaré, s'il a remarqué que ses calculs impliquaient que l'énergie d'un train d'onde se transforme comme la fréquence (cf. note 30), une façon d'associer énergie et fréquence tout en préservant l'idée de mobilité pour la lumière. Un train d'onde plane est ce qu'Einstein appellera «*complexe lumineux*» en 1905; si sa longueur est de l'ordre de la longueur d'onde, il fournit un modèle rudimentaire de quanta, comme il le reconnaîtra dans sa conférence de Salzbourg de 1909 [67]. Le 30 avril, Albert déclare à Mileva: «*Dernièrement, l'idée m'est venue que, lors de la production de la lumière, il pourrait y avoir transformation directe de l'énergie cinétique en lumière, du fait du parallélisme Force vive de la molécule/Température absolue/spectre (énergie spatiale de rayonnement à l'équilibre). Qui sait quand un tunnel pourra être creusé dans ces montagnes dures comme le roc !*» ([17], L 29). Il est possible qu'Albert fasse ici référence aux travaux de Wien de 1896 qui faisaient état d'une proportionnalité entre l'énergie cinétique des molécules et la fréquence du rayonnement qu'elles engendrent dans l'éther; peut-être aussi s'agit-il d'une relecture de Planck qui, en 1900, notait que la température déterminait à la fois «*l'activité principale des molécules*» et «*l'intensité du rayonnement*» ([17], note 7 L 29). Le mois suivant, alors qu'il effectue un remplacement en tant qu'enseignant à l'École technique de Winterthur, Albert prend connaissance de l'article expérimental de Lenard dans les *Annalen* sur l'effet

physiciens non spécialistes de la théorie quantique des champs résument les quanta à des photons (avec une statistique de Bose-Einstein) alors que l'objet qui répond à la loi de Boltzmann $e^{-\epsilon/kT}$ est le mode quantique. Avec $\epsilon_n = nbv$, on a $U = hv / (e^{bv/kT} - 1)$ comme l'avait obtenu Planck [65]. On retrouve $U = kT$ à basse fréquence.

photoélectrique qui a le don de le remplir d'allégresse: «*Je viens juste de lire un article formidable de Lenard sur la production de rayons cathodiques par la lumière ultraviolette. Ce morceau de choix m'a fait une telle impression, il me met dans un tel bonheur et une telle joie qu'il faut absolument que je t'en fasse profiter*» ([17], L 36). Les expériences de Lenard, menées sous un vide poussé, prouvent que les électrons sont arrachés à la cathode métallique par la lumière ultraviolette (et qu'ils ne proviennent pas de l'ionisation du gaz résiduel). L'énergie du rayonnement est donc transmise aux électrons, une sorte de processus inverse de celui pensé par Wien pour les molécules. Il est clair qu'au printemps 1901, comme montré dans [12], une idée des quanta a dû apparaître à Albert Einstein. On peut même imaginer comment elle est arrivée qualitativement à partir des lois du corps noir et du lien quanta – complexe lumineux. Si le quanta a un volume typique $V \sim \lambda^3$, la loi de Stefan pour l'énergie du corps noir $E \propto VT^4$ et celle de Wien $\lambda T = \text{cste}$ (pour le maximum de la courbe de rayonnement du corps noir en fonction de la fréquence $\nu = c/\lambda$) conduisent effectivement à $\varepsilon \propto \nu \propto T$ pour l'énergie d'un quanta. Comme on le verra plus loin, Albert reprendra en 1904 sans le dire cette conception des quanta; mais pour prouver qu'ils sont libres de se déplacer, il faudra un argument quantitatif. C'est l'objet de l'article de mars 1905 [1] qui établit (dans le cadre restreint de la loi de Wien) que la dépendance volumique de l'entropie d'un rayonnement de fréquence ν et d'énergie E est comme celle d'un gaz de N particules avec $EN = h\nu$.³⁹ Comme on le sait, Einstein applique ensuite son résultat à la production et à la transformation de la lumière, et en particulier à l'effet photoélectrique, ce qui lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.

Entre fin 1901 et mars 1905, il y a eu comme on l'a vu (section 3) le passage par la physique statistique suite à la lecture de Boltzmann

³⁹ À partir de la loi de Wien qu'il écrit $\rho = a\nu^3 e^{-\beta h\nu}$ ($\beta = h/k$) pour Planck à partir de 1901) Einstein obtient la dépendance volumique de l'entropie du rayonnement $S - S_0 = (E/\beta\nu) \ln V/V_0$ qu'il compare, de fait, à celle d'un gaz parfait $S - S_0 = N(R/N_A) \ln V/V_0$. Tout se passe donc comme si on avait pour la fréquence ν , des particules ayant chacune l'énergie $EN = \beta\nu RN_A$ ($= h\nu$ avec les notations de Planck qu'Einstein ne reprend pas). Pour faire référence à l'approche statistique de Boltzmann (et néanmoins s'en distinguer), il affirme qu'il est évident que la probabilité statistique pour qu'un gaz de N particules occupe le volume V quand on lui a offert le volume V_0 est $(V/V_0)^N$, d'où il retrouve l'expression de $S - S_0$ pour un gaz.

notamment. Dans le troisième et dernier article [9], Albert met un point final à son interprétation statistique de l'entropie, d'une part en retrouvant l'expression de Boltzmann $S=2K \ln \omega(E)$ (cf. note 19) pour un énergie E donnée, d'autre part en montrant qu'à température fixée, la probabilité de Boltzmann pour un système macroscopique est comme $\exp (S-E/T) /2K$ où $\exp S /2K= \omega(E)$ est le nombre d'états microscopiques associé à E . À partir de là, il établit au §5 pour les fluctuations d'énergie la relation $(\Delta E)^2=2KT^2 d\bar{E} /dT$ où \bar{E} est l'énergie moyenne. Albert ne cite pas Gibbs, qui dans son ouvrage [33] annonce au début du chapitre VII qu'il va calculer toutes les valeurs moyennes des puissances de l'énergie, et donne la même relation trois pages après.⁴⁰ Planck le connaît (cf. section 3) mais les fluctuations sont son domaine. On les trouve dans son livre de 1897, et dans plusieurs articles de 1900 qu'il a écrits sur le corps noir. De son côté, Albert était extrêmement proche de ce résultat au §6 de son premier article [7], et comme Planck, il est intéressé par le rayonnement. Il n'est donc pas étonnant que le dernier paragraphe porte sur ce sujet. Albert dit même en introduction que l'«*espace vide rempli de rayonnement thermique*» est le seul «*pour lequel on peut conjecturer à partir de l'expérience qu'il manifeste une fluctuation d'énergie*». Il précise que pour cela le volume de l'espace considéré doit avoir une dimension de l'ordre de la longueur d'onde λ . Dans ce cas, dit-il, les fluctuations d'énergie ΔE sont de l'ordre de l'énergie moyenne \bar{E} ; mais en raison de la loi de Stefan $\bar{E} \propto VT^4$, cela entraîne que VT^5 , donc que λT est une constante, ce qui n'est autre que la loi de Wien (Albert donne même une valeur numérique). Il reconnaît que son propos est heuristique, mais il ne dit pas que si ΔE est de l'ordre de \bar{E} , c'est qu'il a pensé à un volume qui correspond à un quanta.⁴¹ Ce calcul n'est guère différent de celui indiqué ci-dessus, qu'il a pu faire au printemps 1901, en discutant avec Michele Besso; le fait qu'il arrive de manière un peu impromptue à la fin d'une série de trois articles qui ne visaient pas le corps noir, n'est certainement

⁴⁰ Le §5 de [9] se termine par “the magnitudes of $\bar{\varepsilon}^3$, $\bar{\varepsilon}^4$, etc. can be calculated by successive differentiations without any difficulty”. Pour Albert, l'important n'est pas dans les mathématiques mais dans les applications physiques. Mais cette remarque est aussi une preuve indirecte de sa connaissance de Gibbs.

⁴¹ Pour un gaz monoatomique $\bar{E}= 3/2 NkT$, donc $(\Delta E)^2=kT\bar{E}$; demander $\Delta E \simeq \bar{E}$ n'est autre que faire $N=1$.

pas étranger à l'arrivée de Michele à Berne au Bureau des brevets au côté d'Albert début 1904. Ce rôle moteur de Michele est attesté par son témoignage le 17 janvier 1928, quand il lui écrit: «*De mon côté, j'ai été ton public pendant les années 1904 et 1905; en t'aidant à rédiger tes communications sur le problème des quanta je t'ai privé d'une partie de ta gloire, mais en revanche, je t'ai procuré un ami, Planck*» ([14], p. 141). Elle contient une conclusion très forte, «*un ami, Planck*». C'est ce qui permettra notamment à Albert de devenir rapporteur pour les *Beiblätter* dès le début de l'année 1905. Nous avons vu (section 4) toute l'importance que cela entraînera quelques semaines plus tard, avec la connaissance de la nouvelle formule de Lorentz pour le temps local. Finalement, les réflexions du printemps 1901 et le passage par la physique statistique, ont été à l'origine de l'*Annus Mirabilis* de 1905 et d'un tournant dans la carrière scientifique d'Albert, qui devient Einstein.

RINGRAZIAMENTI

Nous remercions le Professeur Silvio Beretta, Président de l'*Institut lombard, académie des sciences et des lettres*, et le Professeur Gianpiero Sironi, Président honoraire de l'*Institut*, pour leur invitation à venir présenter ce travail. Nous remercions également les professeurs Oreste Nicosini et Carlo Domenico Pagani pour la présentation de la communication et le suivi de la publication. Tous nos remerciements à Madame Matelda Lo Fiego, pour son aimable traduction en italien du résumé.

BIBLIOGRAPHIE

1. A. Einstein, Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, 1905: 17: 132-148; in *The Collected Papers of Albert Einstein, vol.2, The Swiss years: Writings, 1900-1909* [CPAE 2], J. Stachel, D. C. Cassidy, J. Renn et R. Schulmann éditeurs, 150-166, Princeton University Press, Princeton, 1989.
2. A. Einstein, Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik*, 1905: 17: 549-560; in CPAE 2, 224-235.
3. A. Einstein, *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*, K. J. Wyss, Berne, 1905; in CPAE 2, 184-202.
4. A. Einstein, 1905. Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, 1905: 17: 891-921; in CPAE 2, 276-306.

5. A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 1905: 18: 639-641; in *CPAE 2*, 312-314.
6. J. Stachel, *Einstein's Miraculous Year: Five papers that changed the face of physics*, Princeton university press, Princeton, 2005.
7. A. Einstein, Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, *Annalen der Physik*, 1902: 9: 413-433; in *CPAE 2*, 57-73.
8. A. Einstein, Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik, *Annalen der Physik*, 1903: 11: 413-433; in *CPAE 2*, 77-94.
9. A. Einstein, Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme, *Annalen der Physik*, 1904: 14: 354-362; in *CPAE 2*, 99-107.
10. A. Einstein, Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen, *Annalen der Physik*, 1901: 4: 513-523, in *CPAE 2*, 10-20.
11. A. Einstein, Ueber die thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollständig dissociirten Lösungen ihrer Salze und über eine elektrische Methode zur Erforschung der Molecularkräfte, *Annalen der Physik*, 1902: 8: 798-814; in *CPAE 2*, 23-39.
12. R. Rynasiewicz, J. Renn, The turning point for Einstein's *Annus mirabilis*, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2006: 37: 5-35.
13. C. Bracco, *Quand Albert devient Einstein*, CNRS Editions, Paris, 2017; trad. *Quando Albert diventò Einstein. Gli anni italiani 1895-1901*, Pisa University Press, Pisa, 2019.
14. *Albert Einstein-Michele Besso, Correspondance: 1903 -1955*, P. Speziali, Herman, Paris, 1979.
15. A. Einstein, Notes for an Autobiography, *The Saturday Review of Literature*, 26 November 1949.
16. C. Bracco, J.-P. Provost, Les années italiennes du jeune Einstein, la thèse oubliée sur les forces moléculaires, *Reflète de la physique*, 2018:56: 31-34. <<https://doi.org/10.1051/refdp/201856031>>
17. *Albert Einstein, Mileva Marić, Lettres d'amour et de science*, J. Renn, R. Schulmann, Seuil, Paris, 1993; in *The Collected Papers of Albert Einstein, vol.1, The early years, 1879-1902 [CPAE 1]*, J. Stachel, D. C. Cassidy et R. Schulmann éditeurs, Princeton University Press, Princeton, 1987.
18. A. Pais, *Subtle is the Lord: the science and life of Albert Einstein*, Clarendon, Oxford, 1982.
19. C. Bracco, Einstein and Besso: from Zürich to Milan, *Istituto Lombardo (Rend. Scienze)*, 2014: 148: 285-322: <<http://www.ilasl.org/index.php/Scienze/article/view/178>>.
20. C. Bracco, Albert Einstein and the Marangoni family, *SISFA, Atti del XXXVII Convegno*, B. Campanile, L. De Frenza, A. Garuccio, Bari, 26-29 settembre 2017, 73-78, Pavia University Press, Pavia, 2019 <<http://archivio.paviauniversitypress.it/oa/9788869521188>>.
21. R. Shankland, Conversations with Albert Einstein, *American Journal of Physics*, 1963: 31: 47-57.
22. A. Silvestri, *Omaggio ad Albert Einstein*, Politecnico di Milano, Milan, 2005.

23. *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, vol. 5, série II, J. Bosscha éditeur, Nijhoff, La Haye, 1900.
24. C. Bracco, Un aperçu des liens d'Albert Einstein et de Michele Besso avec les universités et les écoles d'ingénieurs italiennes, *Annali di Storia delle università italiane*, 2015: 2: 129-152.
25. M. Reinganum, Molekuläre Anziehung in schwach comprimierten Gasen, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 1900: 5: 574-582.
26. L. Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie*, tome 1 (tome 2), Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1896 (1898).
27. D. Berthelot, Quelques remarques sur l'équation caractéristique des fluides, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 1900: 5: 417-446.
28. J. Renn, Einstein's controversy with Drude and the origin of statistical Mechanics: a new glimpse from the love letters, *Archive for the history of exact sciences*, 1997: 51: 315-354.
29. C. Cercignani, Ludwig Boltzmann, The Man Who Trusted Atoms, Oxford University press, New York, 1998.
30. C. Moore et al., The Ostwald-Gibbs correspondence: an interesting component in the history of the energy concept, *Bulletin for the History of Chemistry*, 2002: 27(2): 114-127.
31. M. Planck, *Vorlesungen über Thermodynamik*, Veit & Cie, Leipzig, 1897.
32. O. Darrigol, *Atoms, mechanics, and probability: Ludwig Boltzmann's statistic-mechanical writings – an exegesis*, Oxford university press, Oxford, 2018.
33. J. W. Gibbs, *Elementary principles in statistical mechanics, developed with special reference to the rational foundations of thermodynamics*, Scribner, New York, 1902.
34. M. Planck, über die mechanische Bedeutung der Temperatur und der Entropie, in *Festschrift Ludwig Boltzmann gewidmet zum sechzigsten Geburtstag*, 113-122, J. A. Barth, Leipzig, 1904.
35. J. W. Gibbs, *Thermodynamische Studien*, Engelmann, Leipzig, 1892.
36. J. Mehra, Einstein and the foundation of statistical Mechanics, *Physica*, 1975: 79A: 447-477.
37. L. Navarro, Gibbs, Einstein and the foundations of statistical Mechanics, *Archive for the history of exact sciences*, 1998: 53: 147-180.
38. L. Peliti, R. Rechtman, Einstein's approach to statistical mechanics: the 1902-1904 papers, *Journal of statistical physics*, 2017: 167: 1020-1038.
39. J. Uffink, Insuperable difficulties: Einstein's statistical road to molecular physics, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 2006: 37: 36-70.
40. A. Einstein, Bemerkungen zu den Hertz'schen Arbeiten „über die mechanischen Grundlagen der Thermodynamik“, *Annalen der Physik*, 1911: 34:175-176; in *Collected Papers of Albert Einstein, vol. 3, The Swiss Years: Writings 1909-1911*, M. J. Klein, A. J. Kox, J. Renn et R. Schulman éditeurs, 313-315, Princeton University Press, Princeton, 1993.
41. E. Mach, *La mécanique, exposé historique et critique de son développement*, J. Gabay, Paris, 1987 (édition originale 1883).
42. P. Drude, *Physik des aethers auf elektromagnetischer Grundlage*, F. Encke, Stuttgart, 1894.

43. A. Fresnel, *Œuvres Complètes*, tome II, 627-636, Imprimerie impériale, Paris, 1868.
44. C. Bracco et J.-P. Provost, La relativité au premier ordre en V/c , remarques pédagogiques et historiques, *Bulletin de l'Union des physiciens*, 2014: 108: 533-546.
45. H. Poincaré, À propos de la théorie de M. Larmor, *L'Éclairage électrique*, 1895: 3: 289-295.
46. W. Wien, Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen, *Annalen der Physik und Chemie*, 1898: 65: Beilage i-xvii.
47. H.-A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Brill, Leyden, 1895; in *Collected Papers vol. 5*, Nijhof, La Haye, 1935-1939: 1-137.
48. H. Poincaré, La théorie de Lorentz et le principe de réaction, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 1900: 5: 252-278.
49. G. Mie, *Beiblätter zu den Annalen der Physik*, 1901: 25/5: 371-374.
50. A. Einstein, Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie, *Annalen der Physik*, 1906: 20: 627-633; in *CPAE 2*, 360-366.
51. O. Darrigol, The mystery of the Einstein-Poincaré connection, *Isis*, 2004: 95: 614-626.
52. A. I. Miller, Why did Poincaré not create Special Relativity in 1905? *Actes du colloque Henri Poincaré: Science et philosophie*, Nancy, 18 May 1994, J. L. Greffe, G. Heinzmann et K. Lorenz éditeurs, Akademie Verlag & Blanchard, Berlin/Paris, 1996.
53. H. Poincaré, *Thermodynamique*, Carré, Paris, 1892 (2^{nde} édition 1908).
54. A. I. Miller, On Einstein, light quanta, radiation, and relativity in 1905, *American Journal of physics*, 1976: 44: 912-923.
55. A. Einstein, How I created the theory of relativity, English translation Y. Ono from notes of J. Ishiwara, *Physics Today*, 1982: 35(8): 45-47.
56. H. Poincaré, *Électricité et Optique*, Carré et Naud, Paris, 1901 (2^{nde} édition).
57. H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902.
58. A. Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, Gauthier-Villars, Paris, 1956.
59. J.-P. Provost, C. Bracco, The 1895 Lorentz transformations: historical issues and present teaching, *European Journal of Physics*, 2016: 37 <doi:10.1088/0143-0807/37/4/045601>.
60. R. Gans, *Beiblätter zu den Annalen der Physik*, 1905: 29/4: 169-170.
61. A. Einstein, Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1907: 4: 411-462; in *CPAE 2*, 433-484.
62. D. A. Goldhammer, Ueber den Druck der Lichtstrahlen, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 1900: 5: 467-483.
63. B. Raffaelli, C. Bracco, J.-P. Provost, Un problème d'oscillateurs: la formule de Planck, *Bulletin de l'union des physiciens*, 2006: 885: 735-739.
64. M. Planck, Ueber die von einem elliptisch schwingenden Ion emittierte und absorbierte Energie, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 1900: 5: 164-174.

65. C. Bracco et J.-P. Provost, Quanta de Planck, d'Einstein et d'«aujourd'hui», *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 2005: 878-879: 909-928.
66. M. Planck, Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik*, 1901: 4(4): 563-573.
67. A. Einstein, Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems, *Physikalische Zeitschrift*, 1909: 10: 185-193; in *CPAE 2*, 542-550.