

Einstein aujourd'hui

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Illustration de couverture : Photographie d'A. Einstein (1905). © Hebrew University of Jerusalem. Archives, California Institute of Technology.

© 2005, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 2-86883-768-9

ISBN CNRS ÉDITIONS 2-271-06311-6

Avant-propos

Par *Michèle Leduc et Michel Le Bellac*

EN 1905, Einstein publiait une série d'articles fondateurs sur la relativité, les quanta lumineux et le mouvement brownien. Un siècle après cet « *annus mirabilis* », il nous a paru intéressant de demander à quelques physiciens français de renom de donner leur point de vue sur l'apport d'Einstein à la physique de ce début du XXI^e siècle. Nous avons choisi de ne pas nous limiter à l'année 1905, mais nous avons pris en compte l'ensemble de l'œuvre scientifique d'Einstein jusqu'au milieu des années 1930. En effet ses derniers travaux passés à la postérité sont d'une part celui sur les fondements de la mécanique quantique, effectué en collaboration avec Podolsky et Rosen et connu sous les initiales « EPR » (1935), et d'autre part celui sur les lentilles gravitationnelles (1936). Le panorama dressé dans ce livre permet de juger de la diversité impressionnante des sujets abordés par Einstein. Parmi les plus marquants, citons :

Quanta : quanta lumineux (1905) ; chaleur spécifique des solides (1907) ; émission stimulée de rayonnement (1917) ; condensation de Bose-Einstein (1923).

Relativité : relativité restreinte (1905) ; énoncé du principe d'équivalence (1907) ; relativité générale (1916).

Fluctuations : mouvement brownien (1905) ; théorie des fluctuations thermodynamiques (1910).

Fondements de la mécanique quantique : article EPR, débats avec Niels Bohr (1935).

Cosmologie : principe cosmologique et constante cosmologique (1917) ; modèle d'Univers en expansion d'Einstein et de Sitter (1932).

Ces travaux ont non seulement ouvert la voie à une bonne partie de la physique du XX^e siècle, mais ils continuent encore aujourd'hui à avoir un impact dans des domaines parfois inattendus : ainsi il a fallu attendre près de 50 ans, avec les travaux de John Bell et les expériences qui ont suivi, pour que soit reconnue l'importance de l'intrication des systèmes quantiques. Ce n'est qu'en 1995 qu'a été vérifiée sans ambiguïté la prédiction de la condensation

de Bose-Einstein. Et Einstein n'avait sûrement pas envisagé que la relativité serait indispensable pour notre système de navigation GPS, un outil qui fait partie maintenant de notre vie quotidienne.

Ce livre contient sept contributions. La première est une introduction historique écrite par Olivier Darrigol, qui décrit en détail la genèse des articles fondateurs de 1905, et plus succinctement celle des travaux ultérieurs. On constatera combien Einstein, loin de l'image du savant solitaire isolé dans son bureau des brevets à Zürich, était parfaitement au courant des grandes interrogations de la physique de son époque et des travaux de ses grands contemporains (Lorentz, Poincaré, Planck, Mach, ...) tout en « les dépassant par l'ampleur et la radicalité de ses points de vue », comme le souligne Olivier Darrigol.

Les trois contributions suivantes concernent la physique quantique, en suivant l'ordre historique inversé des articles fondateurs. Alain Aspect et Philippe Grangier montrent comment Einstein, Podolsky et Rosen (EPR), parallèlement à Erwin Schrödinger, avaient mis en lumière une particularité unique de la mécanique quantique, qui est largement connue aujourd'hui sous le nom d'intrication des systèmes quantiques. Einstein, très opposé à l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, s'était appuyé sur l'intrication afin d'essayer de prouver que la mécanique quantique constituait une description incomplète de la réalité physique. Niels Bohr avait jusque là répondu brillamment aux objections antérieures d'Einstein, mais il ne put donner cette fois qu'une réponse alambiquée. Ce débat de géants tomba dans l'oubli pendant une trentaine d'années, et il fallut attendre les travaux de John Bell en 1964 pour que l'article EPR revienne sur le devant de la scène. En effet, John Bell put montrer que les idées contenues dans cet article étaient susceptibles de vérification expérimentale. Alain Aspect et Philippe Grangier décrivent les expériences récentes qui ont permis d'invalider la conclusion immédiate du travail EPR (il faut compléter la mécanique quantique), tout en montrant en revanche combien la notion d'intrication est fondamentale : jointe aux progrès expérimentaux qui permettent de manipuler des objets quantiques individuels, elle a donné naissance à une « nouvelle révolution quantique », dont un exemple est l'information quantique.

Dans l'article suivant, Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard et Frank Laloë examinent la postérité du travail de 1923, qui prédisait le phénomène appelé aujourd'hui « condensation de Bose-Einstein », le fait que des atomes d'un certain type (obéissant à la statistique de Bose) ont tendance à s'accumuler dans un état quantique unique à très basse température. Einstein lui-même était assez sceptique sur la possibilité de mettre cet effet en évidence. Depuis les premières vérifications expérimentales de la condensation de Bose-Einstein en 1995, on assiste à une explosion de travaux sur ce nouvel état de la matière. L'intérêt du phénomène vient de la relation fascinante et controversée entre superfluidité et condensation de Bose-Einstein, et aussi des perspectives de transposer toute l'optique aux ondes de matière, et de fabriquer des « lasers à atomes ». Enfin les condensats de Bose-Einstein atomiques gazeux (et les gaz

d'atomes fermioniques à très basse température) permettent de réaliser des systèmes modèles qui servent à tester des idées de la physique de la matière condensée dans des conditions parfaitement contrôlées.

Dans la dernière contribution à cette série « quantique », Jean-Paul Pocholle fait le point sur ce qui est sans doute l'application la plus largement connue des travaux de 1917, le laser. L'apport conceptuel d'Einstein à la théorie de l'interaction lumière-matière est essentiel. Il a en effet introduit la notion d'émission stimulée de rayonnement, qui est à l'origine du processus d'émission laser ; celle-ci a vu le jour dans les laboratoires à la fin des années 1950, lorsque les physiciens ont été capables de réaliser des inversions de population de niveaux atomiques ou moléculaires. Depuis lors, la technologie du laser a enregistré des progrès spectaculaires, allant des diodes laser à semi-conducteur de taille micrométrique jusqu'aux sources laser à verre dopé surpuissantes pour la fusion contrôlée. Les applications des lasers sont aujourd'hui trop nombreuses pour être recensées de façon exhaustive ; ils sont devenus les compagnons de notre vie quotidienne tout autant que des outils incontournables pour la recherche.

L'apport d'Einstein à la théorie du mouvement brownien et aux fluctuations statistiques est sans doute moins connu que ses contributions à la physique quantique et à la relativité. Elle n'en est pas moins essentielle, car il fut le premier à saisir le lien quantitatif entre les fluctuations d'origine microscopique et les propriétés thermodynamiques, une idée à la base de la physique statistique moderne. Comme le montre Olivier Darrigol, sa compréhension profonde des fluctuations constitue aussi le fil directeur de ses travaux sur la physique quantique. Dans leur chapitre, Bernard Derrida et Eric Brunet donnent un aperçu de la variété des problèmes de physique allant de la théorie du mouvement brownien à celle des polymères, du théorème fluctuation dissipation aux systèmes hors équilibre, qui sont dans le prolongement des travaux d'Einstein.

Les deux derniers chapitres, par Thibault Damour et François Bouchet, sont des synthèses très documentées et actualisées sur la relativité générale et la cosmologie. Après la relativité restreinte en 1905, il fallut à Einstein une dizaine d'années de travail acharné pour mettre au point sa théorie relativiste de la gravitation, ou relativité générale. Cette extraordinaire construction intellectuelle connut des débuts très médiatisés en raison de l'expédition d'Eddington confirmant la déviation des rayons lumineux par le Soleil. Elle fut cependant assez largement ignorée des physiciens jusqu'au début des années 1960, en raison de ses difficultés mathématiques et du caractère limité des tests expérimentaux envisageables à l'époque. Comme le montre Thibault Damour, la perception de la relativité générale est totalement différente aujourd'hui. Elle est vérifiée dans un grand nombre de situations, qui vont de notre environnement immédiat (système GPS) jusqu'aux confins de l'Univers, avec une précision relative qui peut atteindre 10^{-5} . Elle est devenue une théorie indispensable de l'astrophysique contemporaine : elle est à la base de notre

compréhension des étoiles massives, des trous noirs, des lentilles gravitationnelles et des ondes gravitationnelles.

La relativité générale est au fondement de la cosmologie moderne. C'est ce qu'Einstein avait compris dès 1917, comme en témoigne la saga de la constante cosmologique (notée Λ), qu'il introduisit dans un premier temps afin de rendre compte d'un Univers supposé statique, pour la renier quinze ans plus tard quand s'imposa l'idée de l'expansion de l'Univers. François Bouchet décrit l'évolution fulgurante de la cosmologie depuis dix ans, qui aboutit aujourd'hui au modèle standard dit Λ CDM, où figurent Λ parce que la constante cosmologique a finalement refait surface et CDM, initiales de Cold Dark Matter, la matière sombre froide. Ce modèle standard rend compte de façon remarquable d'un grand nombre d'observations d'origine très diverse, tout en nous apprenant que la matière telle que nous la connaissons ne représente qu'une fraction infime (moins de 5 %) de l'Univers : les observations concordent pour suggérer qu'il est aussi constitué de 25 % de matière sombre et de 70 % d'énergie sombre, dont la nature reste aujourd'hui complètement mystérieuse.

L'année 2005 a été choisie comme « année mondiale de la physique » par l'ONU et l'UNESCO pour commémorer l'« annus mirabilis » dont c'est le centième anniversaire, et ce livre s'inscrit dans cette perspective. Nous remercions les auteurs, qui figurent parmi les meilleurs spécialistes au monde dans leurs disciplines respectives, d'avoir pris le temps d'apporter des contributions originales tout spécialement dédiées à ce centième anniversaire.



Michèle Leduc

Michèle Leduc est directrice de recherche au CNRS. Elle poursuit des recherches en physique des atomes refroidis par laser au Laboratoire Kastler Brossel à l'École Normale Supérieure (Paris). Elle dirige la collection « Savoirs Actuels » du CNRS depuis 1986.



Michel Le Bellac

Michel Le Bellac est professeur émérite à l'Université de Nice, chercheur au laboratoire INLN à Sophia Antipolis. Auteur de nombreux livres de physique, il est le coordinateur de l'ouvrage « Einstein aujourd'hui ».

Table des matières

Avant-propos	iii
<i>Michèle Leduc et Michel Le Bellac</i>	
1 1905 : un nouvel élan	1
<i>Olivier Darrigol</i>	
2 De l'article d'Einstein Podolsky et Rosen à l'information quantique : les stupéfiantes propriétés de l'intrication . . .	39
<i>Alain Aspect et Philippe Grangier</i>	
3 La condensation de Bose-Einstein dans les gaz	87
<i>Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard et Franck Lalö</i>	
4 De l'émission stimulée d'Einstein aux lasers aujourd'hui	129
<i>Jean-Paul Pocholle</i>	
5 Le mouvement brownien et le théorème de fluctuation-dissipation	203
<i>Bernard Derrida et Éric Brunet</i>	
6 Relativité générale	267
<i>Thibault Damour</i>	
7 Cosmologie	321
<i>François R. Bouchet</i>	

Chapitre 1

1905 : un nouvel élan

Par *Olivier Darrigol*

Sommaire

1.1	Thème de recherche 1 : l'électrodynamique des corps en mouvement	7
1.2	Thème de recherche 2 : microphysique théorique	13
1.3	Thème de recherche 3 : le rayonnement du corps noir	17
1.4	Les clefs du succès	21
1.5	Trois réceptions	23
1.6	L'esprit relativiste	24
1.7	L'énigme quantique	28
1.8	Après la mort	34
1.9	Sources et références	35



Olivier Darrigol

Olivier Darrigol est directeur de recherche au CNRS, membre du groupe d'Histoire des sciences Rehseis (Paris). Après une formation initiale en physique théorique, il s'est orienté vers l'Histoire des sciences. Il est l'auteur d'ouvrages concernant l'Histoire de la physique quantique, celle de l'électrodynamique et celle de l'hydrodynamique. Il a contribué à l'édition des œuvres choisies d'Einstein en français.

1905 : un nouvel élan

C'ÉTAIT IL Y A CENT ANS. Albert Einstein publiait dans *Annalen der Physik* son fameux triptyque : quanta lumineux / mouvement brownien / relativité. Dans le présent ouvrage, quelques physiciens d'aujourd'hui témoignent de la fertilité du genre de théorie physique inauguré en ce temps. Le but de l'essai historique que voici est de montrer comment l'année 1905 marqua un tournant dans la quête intellectuelle d'Einstein, de la critique des fondements à la construction hésitante, paradoxale et inachevée d'une nouvelle physique.

Pour un adolescent de la fin du XIX^e siècle, témoin d'un afflux de merveilles techniques, lecteur avide d'ouvrages de vulgarisation scientifique et fils d'un chef d'entreprise d'électrotechnique, il était bien naturel de se passionner pour les sciences physiques. Dès ses années de lycée, Einstein savait qu'il voulait devenir physicien théoricien ou mathématicien. En témoigne l'essai qu'il écrivit à l'occasion d'un examen de Français¹ :

Mes projets d'avenir.

Un homme heureux est trop content de la présence [du présent] pour penser beaucoup à l'avenir. Mais de l'autre côté ce sont surtout les jeunes gens qui aiment à s'occuper de hardis projets. Du reste c'est aussi une chose naturelle pour un jeune homme sérieux, qu'il se fasse une idée aussi précise que possible du but de ses désirs.

Si j'avais le bonheur de passer heureusement mes examens, j'irai à l'école polytechnique de Zürich. J'y resterais quatre ans pour étudier les mathématiques et la physique. Je m'imagine de devenir professeur dans ces branches de la science de la nature en choisissant la partie théorique de ces sciences.

Voici les causes qui m'ont porté à ce projet. C'est surtout la disposition individuelle pour les pensées abstraites et mathématiques, le manque de la phantasie [imagination] et du talent pratique. Ce sont aussi mes désirs qui me conduisaient à la même résolution. C'est tout naturel ; on aime toujours faire les choses pour lesquelles on a le talent. Puis c'est aussi une certaine indépendance de la profession scientifique qui me plaît beaucoup.

¹A. Einstein, essai extrait de la Staatsarchiv Kanton Argau, reproduit dans [2] pp. 42–43 (fac-similé avec les corrections du professeur, ignorées dans la présente transcription). Cet essai valut à Einstein la note 3-4 sur 6. Voir [1–3].

À l'âge de seize ans, Einstein imagine un modèle de l'éther électromagnétique, un peu naïf mais cohérent. « *C'est le cœur lourd* », écrit-il sur un ton qu'il allait vite abandonner, « *que je concentre ces réflexions en un essai qui apparaît plus comme un programme que comme un mémoire. . . Fasse que l'indulgence du lecteur bien disposé soit à la mesure du sentiment d'humilité avec lequel je soumetts ces lignes.* » L'année suivante, à son entrée au *Polytechnikum* de Zurich, il décide fermement de se consacrer à la physique. Durant le reste de ses études, il partage son temps entre la fréquentation du laboratoire, les recherches personnelles et une liaison amoureuse avec son condisciple serbe Mileva Marić. Il ne suit qu'une partie des cours, qu'il juge trop dogmatiques, et préfère lire les grands auteurs de l'époque : Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, Drude, Boltzmann, Mach et Poincaré².

Ambitieux, à l'affût de la nouveauté, Einstein médite déjà sur les tensions de la physique contemporaine, sur les points d'achoppement signalés par les grands maîtres. Il n'en manquait pas. Dans les douze dernières années du siècle et particulièrement en Allemagne, la physique avait connu une avalanche de découvertes qui remettaient en question bien des idées reçues. En 1888, les expériences de Heinrich Hertz avaient imposé la théorie électrodynamique de James Clerk Maxwell au dépend des vieilles théories allemandes d'action directe à distance. Dans les années 1890, les découvertes des rayons X, de la radioactivité et de l'électron avaient nourri une nouvelle microphysique expérimentale. Aux yeux d'un nombre croissant de physiciens, atomes, ions et électrons n'étaient plus de simples fictions théoriques : il devenait possible d'étudier dans le laboratoire des conséquences assez directes de leur existence [5, 6].

En raison de ces développements, les jugements sur les théories existantes évoluèrent, de nouvelles théories apparurent, on débattit de leurs mérites et l'on s'interrogea sur les fondements de la théorie physique en général. Dans le domaine de l'électromagnétisme, Hertz proposa une version plus abstraite de la théorie de Maxwell, où les équations fondamentales étaient posées comme axiomes, sans aucun fondement mécanique. À l'instar de Maxwell, Hertz admettait toutefois l'existence d'un milieu de propagation, l'éther, éventuellement modifié par la présence de matière. Par souci de simplicité, il supposait que ce milieu était complètement entraîné par la matière dans ses mouvements. Mais comme il le soulignait lui-même, cette hypothèse était contredite par des expériences d'optique des corps en mouvement (par exemple, l'expérience de Hippolyte Fizeau de 1851, selon laquelle la lumière se propageant à travers un courant d'eau n'est que partiellement entraînée par ce courant). Einstein fut frappé par cette remarque de Hertz et esquissa à ce moment une approche de l'électromagnétisme semblable à celle du théoricien néerlandais Hendrik Lorentz, dont il prit connaissance un peu plus tard³.

²Einstein, « *Über die Untersuchung des Aetherzustandes in magnetischem Felde* », manuscrit de 1895 [4] (vol. 1 : pp. 6–9).

³Voir [6] et la lettre d'Einstein à Marić d'août 1899, [4] (vol. 1, traduit dans [10] vol. 2 : pp. 28–29).

Le but général de Lorentz était de résoudre les difficultés de la théorie électromagnétique de la lumière. Pour rendre compte de la dispersion optique et des effets du mouvement des corps transparents, il admettait, contrairement à Maxwell, que toutes les interactions entre l'éther et la matière s'effectuaient via des particules chargées (ions ou électrons) et que l'éther se laissait traverser par les particules de matière sans être aucunement entraîné. L'autorité de cette conception crut considérablement vers la fin du siècle, quand l'effet magnéto-optique de Pieter Zeeman, la découverte de l'électron et de nouvelles expériences d'optiques des corps en mouvement vinrent la confirmer. Les lettres d'Einstein de cette époque montrent qu'il la partageait [7].

Un peu plus tard, en 1901, Einstein lut les *Leçons sur la théorie des gaz* de Ludwig Boltzmann, avec un enthousiasme qui le poussa à s'exclamer : « *Der Boltzmann ist ganz grossartig!* » Comme Einstein le savait, la théorie de Boltzmann, développée de 1868 à 1895 à partir de la théorie cinétique des gaz de Maxwell, avait longtemps été négligée en Allemagne au profit de la thermodynamique macroscopique. Mais à la fin du siècle, la nouvelle microphysique expérimentale renforça les conceptions atomistes et permit de nouvelles applications ou transpositions de la théorie cinétique des gaz, par exemple les théories de l'ionisation par les rayons X ou la théorie électronique des métaux de Paul Drude. C'est à propos de cette dernière qu'Einstein s'exclama : « *Der Drude ist ein genialer Kerl.* » Sans doute était-il frappé par le succès d'une combinaison de deux innovations majeures, la théorie des électrons et la théorie cinétique des gaz, à l'intersection de deux domaines de la physique⁴.

Einstein suivit aussi, d'un œil critique, les travaux de Max Planck sur le rayonnement du corps noir, qui comme ceux de Drude mêlaient électromagnétisme et phénomènes thermiques. Stimulé par les recherches de Boltzmann, Planck cherchait à comprendre l'irréversibilité thermodynamique à partir de la micro-dynamique sous-jacente. Mais il ne tolérait pas l'interprétation statistique de la loi de croissance de l'entropie, et rejetait par conséquent la théorie cinétique moléculaire qui y conduisait. La véritable cause de l'irréversibilité, selon lui, était à chercher dans les interactions entre matière et rayonnement électromagnétique. Après maints efforts et diverses péripéties, il en vint à adopter une version formelle de la relation de Boltzmann entre entropie et probabilité et obtint ainsi la formule du rayonnement noir qui porte son nom. Nous y reviendrons plus loin. Mais notons déjà que pour Planck l'intérêt principal de cette dérivation était d'établir un pont entre théorie des gaz et théorie du rayonnement, et de permettre une nouvelle estimation du nombre d'Avogadro, en fait la plus précise de l'époque [4 ; vol. 1, 8].

De ses lectures au front des théories de l'époque, Einstein tira trois thèmes de recherche :

(1) Clarifier les relations entre l'éther et la matière, en rapport avec les difficultés de l'optique des corps en mouvement.

⁴Einstein à Marić, 13 septembre 1900 [4] (vol. 1 : pp. 259–261) ; 4 avril 1901 [4] (vol. 1 : pp. 284–286).

(2) Donner des moyens plus directs et plus précis d'accéder aux grandeurs moléculaires et affermir les fondements de la théorie de Boltzmann.

(3) Éclaircir les mécanismes responsables du rayonnement noir.

Einstein fut aussi sensible aux commentaires méthodologiques dont les grands physiciens de l'époque accompagnaient leurs travaux théoriques. Hertz insistait sur le caractère symbolique de la théorie physique, sur la nécessité de définitions opérationnelles des grandeurs fondamentales, et sur l'élimination des redondances dans la représentation des phénomènes. Boltzmann défendait la liberté de construction des théories physiques, et critiquait ceux qui croyaient ne point faire d'hypothèses en se confinant à la phénoménologie mathématique. Helmholtz et Planck promouvaient un genre de physique dans lequel des principes généraux tels que la conservation de l'énergie ou le principe de moindre action devaient guider et contraindre la construction des théories. Ils étaient convaincus d'une unité profonde de la physique et tentaient d'établir de nouveaux ponts entre des domaines jusque là séparés. Les adeptes d'une telle physique des principes, particulièrement Wilhelm Wien et Henri Poincaré, se servaient volontiers d'expériences de pensée pour explorer le jeu combiné des principes [1, 6].

Einstein prit ainsi conscience de diverses stratégies dont il pouvait s'inspirer au gré des circonstances. Et il s'imprégna d'une conception de la physique théorique qui intégrait la critique des fondements dans l'élaboration des théories. Sa lecture des écrits philosophiques de David Hume, Ernst Mach et Henri Poincaré renforça cette dimension de sa pensée. Pour ces auteurs comme pour les grands théoriciens de l'époque, il n'était plus question de concevoir une genèse purement inductive de la théorie physique. Certes, l'expérience restait le point de départ et le point d'arrivée de toute théorie. Mais l'activité intellectuelle du théoricien avait sa propre dynamique, ses propres outils critiques et constructifs. C'est à ce moment que la physique théorique devint une discipline autonome, surtout en Allemagne [5, 9].

Porté par cet élan de la physique théorique, Einstein mûrit ses réflexions sur les trois thèmes du rapport éther/matière, des grandeurs moléculaires et du rayonnement. Au printemps 1905, il annonce à son ami Conrad Habicht une série de progrès sur ces trois fronts, d'un ton jovial et badin⁵ :

Cher Habicht,

Il règne entre nous un silence sacré, au point que j'ai un peu le sentiment de commettre une profanation en le brisant aujourd'hui par un bavardage sans grand intérêt. Mais toutes les choses élevées ne finissent-elles pas ainsi en ce monde ?

Que faites-vous donc, espèce de baleine congelée, espèce de quartier d'âme fumée en conserve, ou que sais-je encore que j'aimerais vous jeter à la figure, emporté que je suis par 70 % de colère et 30 % de pitié ! Vous pouvez remercier ces 30 % qui m'ont empêché que je ne vous expédie l'autre jour — alors que, plus silencieux qu'une tombe, vous n'étiez pas apparu à Pâques — une boîte de conserve remplie d'oignons et d'ail coupés en rondelles.

⁵Einstein à Habicht, printemps 1905, [4] vol. 3, traduit dans [10] vol. 1 : p. 36.

Mais pourquoi donc ne m'avez-vous toujours pas envoyé votre thèse? Ne savez-vous point, affreux personnage, que je fais partie des une personne et demie qui la parcourraient avec plaisir et intérêt? Je vous promets en échange quatre travaux, dont je pourrai prochainement vous envoyer le premier, car je dois recevoir très bientôt les exemplaires d'auteur. Il y est question de rayonnement et des propriétés énergétiques de la lumière, d'une façon tout à fait révolutionnaire, ainsi que vous le verrez si vous m'envoyez *auparavant* votre thèse.

Mon deuxième travail est une détermination de la taille véritable des atomes à partir de la diffusion et de la viscosité des solutions liquides diluées de substances neutres. Dans le troisième, je démontre que, d'après la théorie moléculaire de la chaleur, des corps d'un ordre de grandeur de 1/1000 mm en suspension dans un fluide doivent déjà effectuer un mouvement désordonné perceptible, lui-même provoqué par l'agitation thermique; et, de fait, les physiologistes ont observé des mouvements affectant de petits corps inanimés en suspension, mouvements auxquels ils donnent le nom de « mouvement moléculaire brownien. »

Le quatrième travail est encore à l'état d'ébauche; il s'agit d'une électrodynamique des corps en mouvement qui repose sur des modifications de la théorie de l'espace et du temps. La partie purement cinématique de ce travail vous intéressera sûrement.

Solo[vine] continue à donner des cours particuliers et ne se décide pas à passer l'examen; je le plains beaucoup, car il mène une bien triste existence. Il a d'ailleurs l'air bien éprouvé. Mais je ne crois pas qu'il soit possible de l'amener à avoir des conditions de vie plus supportables. Vous savez comment il est!

Bien cordialement,

Votre A.E.

Vous avez également toutes les amitiés de ma femme et du petit diable, qui a maintenant un an.

Envoyez vite votre travail!

Dans ce qui suit, nous allons voir comment Einstein aboutit aux quatre travaux auquel il fait allusion dans cette lettre, en suivant l'ordre historique d'apparition de ses thèmes de recherche plutôt que l'ordre des publications de 1905. Puis nous examinerons les clefs de son succès, la réception immédiate de ses travaux et les prolongements qu'il leur donna lui-même. Nous concluons par quelques indications de l'efflorescence actuelle de la physique einsteinienne.

1.1 Thème de recherche 1 : l'électrodynamique des corps en mouvement

La correspondance d'Einstein des années 1899–1901 porte plusieurs traces de son intérêt pour l'électrodynamique des corps en mouvement et pour les phénomènes optiques apparentés. Une lettre à Marić d'août 1899 témoigne de l'avancement de ses réflexions⁶ :

⁶Voir note 3.

J'étudie une nouvelle fois avec la plus grande attention *La propagation de la force électrique* de Hertz. . . 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 physique à ce que l'on dit. . . Il faudra considérer les courants électriques non comme « une polarisation électrique s'annulant dans le temps » [point de vue de Maxwell] mais comme un mouvement de masses électriques vraies, dont les équivalents chimiques semblent prouver l'existence [allusion à la loi de Faraday]. . . L'électrodynamique serait alors la théorie des déplacements de [masses] électriques et magnétiques en mouvement.

Comme Lorentz et avant de l'avoir lu, Einstein pensait que tous les phénomènes électromagnétiques impliquant la matière devaient pouvoir se ramener aux interactions entre des particules chargées (les ions) et un éther stationnaire, dépourvu de toute matérialité. Ainsi un courant de conduction devait-il être compris comme une circulation d'ions ; une polarisation comme un déplacement d'ions élastiquement liés. La stationnarité rigoureuse de l'éther suggérait un effet du mouvement des dispositifs optiques terrestres par rapport à l'éther, qu'Einstein pensait pouvoir démontrer en comparant les intensités de la lumière émise par une source terrestre dans deux directions opposées [11].

Einstein pensait aussi que le mouvement d'un corps transparent par rapport à l'éther devait affecter la propagation de la lumière. En effet, en se propageant dans un corps transparent, une onde électromagnétique engendrait une vibration sympathique des ions et un rayonnement secondaire de ces ions. L'interférence des rayonnements primaire et secondaire permettait de prévoir, en sus de l'effet d'indice optique, un effet du mouvement de ce corps sur la vitesse de la lumière. Einstein proposa à son professeur de physique, Heinrich Weber, une expérience qui permit de tester cette conséquence de la stationnarité de l'éther⁷.

Sans qu'Einstein en fût encore conscient, Lorentz avait déjà calculé ce dernier effet, et Hippolyte Fizeau l'avait expérimentalement mesuré. Le coefficient théorique d'entraînement de la lumière, $1 - 1/n^2$ si n est l'indice optique, était celui qu'Augustin Fresnel avait jadis introduit afin que les lois de la réfraction dans un prisme terrestre fussent insensibles au vent d'éther. L'expérience en confirmait la valeur. Weber, qui était conscient de ces développements, traita Einstein de haut (*stiefmütterlich*, selon l'intéressé) et le renvoya à la lecture d'un mémoire de Wien de 1898 récapitulant les progrès récents des physiciens sur la question du mouvement de l'éther. Wien discutait l'expérience de Fizeau, la théorie de Lorentz et maintes tentatives, toutes vaines, de détecter des effets du vent d'éther créé par le mouvement de la terre. Parmi celles-ci se trouvait l'expérience de 1887 par laquelle Albert Michelson et Edward Morley comparaient interférométriquement les vitesses de la lumière dans deux directions orthogonales. Le résultat positif de l'expérience

⁷Voir Einstein à Marić, 28 (?) septembre 1899, [4] vol. 1 : pp. 233–235.

de Fizeau semblait confirmer la stationnarité de l'éther, alors que le résultat négatif de celle de Michelson et Morley suggérait un entraînement total de l'éther par la matière ! [6, 7, 13, 14]

On imagine aisément la perplexité d'Einstein face à ce verdict contradictoire de l'expérience. Il continua quelque temps à imaginer de nouvelles expériences de détection du vent d'éther. Comme il l'apprit au début de 1902, Lorentz était parvenu, dans un ouvrage de 1895, à rendre compte du résultat négatif de telles expériences, dans la mesure où leur précision n'excédait pas le carré du rapport de la vitesse v de la terre (par rapport à l'éther) à celle, c , de la lumière. Au premier ordre, sa démonstration s'appuyait sur un passage du repère de l'éther à celui de la terre par la transformation $x' = x - vt$, suivi de l'introduction du « temps local » $t' = t - vx'/c^2$, qui permettait de retrouver la forme originale des équations de Maxwell (supposées valides dans le repère de l'éther). Au second ordre, Lorentz obtenait la même invariance en tenant compte d'une contraction longitudinale des corps solides lors de leur déplacement par rapport à l'éther, dans un rapport $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Cette contraction était nécessaire à l'équilibre interne d'un solide en mouvement, dans la mesure où ce mouvement affectait les forces de cohésion moléculaire comme des forces électromagnétiques [14].

Ainsi la théorie de Lorentz pouvait-elle rendre compte de la totalité des phénomènes électromagnétiques et optiques connus, y compris les expériences de Fizeau et de Michelson-Morley. Elle ne faisait pourtant pas l'unanimité. Au nom d'un positivisme Machien, l'électrodynamicien strasbourgeois Emil Cohn préférait s'abstenir complètement de l'éther, traiter les champs électriques et magnétiques comme des entités physiques indépendantes et modifier les équations de Maxwell macroscopiques dans la matière de telle sorte qu'elles rendent compte à la fois des expériences de Fizeau et de Michelson-Morley (1900–1904). À Bonn, Alfred Bucherer partit du principe, vérifié par les vieilles théories allemandes de l'électrodynamique, que les interactions électromagnétiques ne pouvaient dépendre que du mouvement de la matière par rapport à la matière ; il élimina l'éther ; et il suggéra de n'utiliser les équations de Maxwell que formellement, comme un moyen de calculer la force s'exerçant sur une particule chargée dans le repère tangent à son mouvement (1903–1906) [6].

Mais le critique le plus influent de Lorentz fut Henri Poincaré. Le mathématicien français ne voyait dans l'éther qu'une métaphore commode, un résidu de l'analogie fondatrice entre lumière et vibration d'un milieu élastique. Par conséquent, il jugeait extrêmement improbable que l'éther puisse être traité comme un autre corps matériel dans l'application des principes de la mécanique. En particulier, il fut le premier à penser, dès 1899, que le principe de relativité devait s'appliquer à la matière seule, sans considération de l'éther. Autrement dit, il jugeait que l'impossibilité de détecter le vent d'éther devait être érigée en principe. Il pensait aussi, en 1900, que le principe de l'égalité de l'action et de la réaction devait s'appliquer à la matière seule. Or la théorie de Lorentz violait ces deux principes entendus en ce sens. En effet, elle impliquait

le recul d'un émetteur unidirectionnel de rayonnement ; elle prévoyait un effet du premier ordre du vent d'éther sur les forces électromagnétiques ; et elle ne parvenait à expliquer l'absence d'autres effets de ce vent qu'au pris d'une accumulation d'hypothèses [6, 9, 14].

Dans un mémoire capital de 1900, Poincaré accompagna ces critiques d'une interprétation nouvelle des changements de champs et de coordonnées que Lorentz utilisait de manière purement formelle dans ses démonstrations d'indétectabilité du vent d'éther. Selon Poincaré, les champs et coordonnées transformés étaient ceux que des observateurs en mouvement (par rapport à l'éther) mesureraient en suivant certaines conventions naturelles. En particulier, le « temps local » $t' = t - vx'/c^2$ de Lorentz devait être interprété (au premier ordre) comme le temps mesuré par des observateurs se mouvant à la vitesse v et ayant synchronisé leurs horloges par l'échange de signaux lumineux sans tenir compte de leur mouvement par rapport à l'éther (et faisant donc comme si la lumière se propageait à la vitesse constante c dans leur propre repère) [6, 15, 16].

Lorentz ne réagit pas à cette remarque et continua d'interpréter ses transformations comme relevant d'états fictifs. En 1904, il parvint cependant à les généraliser à tous les ordres en v/c . À une transformation galiléenne près, ces nouvelles transformations correspondaient à peu près à ce que Poincaré allait appeler « les transformations de Lorentz ». Mais l'invariance formelle était encore imparfaite (pour les termes de couplage) et du point de vue de Lorentz elle n'impliquait pas directement l'invariance des phénomènes. Il fallait encore supposer que la contraction de Lorentz s'appliquait aux électrons et ne retenir que la composante dipolaire du rayonnement. Au-delà de cette dernière approximation, l'éther restait en principe détectable [17].

À la lecture de ce nouveau mémoire, Poincaré comprit que de légères modifications des transformations de Lorentz conduisaient à un groupe d'invariance exacte des équations de Maxwell-Lorentz. Il affirma que cette invariance formelle impliquait une invariance exacte des phénomènes, conformément au principe de relativité. Il jugea que le même groupe d'invariance devait s'appliquer à tout type de force, y compris les forces de cohésion de l'électron et les forces gravitationnelles. Il obtint ainsi un modèle d'électron contractile et la dynamique relativiste correspondante. Enfin, il proposa une modification covariante de la loi de Newton grâce à un formalisme quadri-dimensionnel semblable à celui ultérieurement développé par Hermann Minkowski. Ces résultats parurent sous forme de résumé dans les *Comptes rendus* de juin 1905, et en 1906 dans un long et savant mémoire sur « la dynamique de l'électron » [2, 7, 9, 12, 18, 19].

Lors de leçons données à la Sorbonne en 1906, Poincaré montra de surcroît que les transformations de Lorentz étaient compatibles avec sa procédure optique de synchronisation des horloges, compte tenu de la contraction de Lorentz. Et il mit à profit l'invariance de Lorentz pour établir directement les équations du mouvement de l'électron, sans aucun modèle. Tout cela nous rapproche de la relativité d'Einstein. Il importe toutefois de souligner que

Poincaré, jusqu'à la fin de sa vie, maintint une nécessité psychologique de l'éther et continua de discerner l'espace et le temps « vrais », liés à l'éther, de l'espace et du temps « apparents », mesurés par des observateurs en mouvement. En vertu du principe de relativité, le choix du référentiel de l'éther ne pouvait être que purement conventionnel, mais il permettait de maintenir les concepts ordinaires d'espace et de temps, que Poincaré jugeaient trop enracinés dans l'usage courant pour que l'étude de situations physiques extrêmes justifîât leur remplacement [6, 20].

Revenons en 1901, à Einstein et à sa perplexité face au conflit entre le résultat de Fizeau et celui de Michelson-Morley. À un moment bien antérieur à 1905 mais que les documents connus ne permettent pas de dater précisément, Einstein cessa de s'interroger sur la possibilité éventuelle d'effets du vent d'éther et admit le principe de relativité. Contrairement à Poincaré (mais comme Bucherer), il décida de rejeter l'éther devenu complètement indétectable et d'admettre que la vitesse de la lumière dépendait de la vitesse de sa source, comme elle l'aurait fait dans une théorie corpusculaire newtonienne. Ce point de vue, développé par Walter Ritz en 1908, satisfait immédiatement au principe de relativité et permet de retrouver la plupart des résultats de l'électrodynamique de Lorentz, dans la mesure où les actions d'une source sont décrites par une expression modifiée des potentiels retardés tenant compte du mouvement de la source. Mais au bout d'un certain temps, Einstein se persuada que ce point de vue conduisait à des effets paradoxaux d'auto-couplage. Le dilemme de l'électrodynamique des corps en mouvement restait donc entier : si la vitesse de la lumière avait une valeur constante, indépendante de sa source (comme le suggérait la théorie de Lorentz), alors d'après le principe de relativité cette constante devait être la même dans tout référentiel inertiel, contrairement à la loi galiléenne d'addition des vitesses⁸.

Einstein rapporte qu'au début de 1905, lors d'une conversation avec son ami Michele Besso [1], il eut soudain l'idée que le temps pouvait être redéfini de telle manière que la vitesse de la lumière soit effectivement la même dans tout référentiel inertiel. Très vite, utilisant une synchronisation optique des horloges semblable à celle de Poincaré, il put montrer le caractère relatif de la simultanéité et dériver la forme exacte des transformations de Lorentz. Il examina ensuite les effets physiques de contraction des longueurs et de dilatation des temps ; il obtint la nouvelle loi d'addition des vitesses ; il démontra l'invariance des équations de Maxwell-Lorentz sous le groupe de transformation de Lorentz, avec quelques applications à l'optique des corps en mouvement ; et il donna la forme invariante relativiste des équations de la dynamique [2, 9, 12, 21].

Tel est en bref le contenu du célèbre article reçu le 30 juin 1905 par *Annalen der Physik* [21]. Les sources de l'inspiration soudaine d'Einstein

⁸Voir [4] vol. 2 : pp. 263–264. Le 17 décembre 1901, Einstein confiait à Marić (vol. 1 : pp. 325–326) qu'il travaillait à un « article capital » sur l'électrodynamique des corps en mouvement. Rien n'indique s'il pensait encore à une théorie du type de celle de Lorentz ou s'il s'agissait déjà d'une théorie de l'émission.

restent à ce jour mystérieuses. De façon certaine, on sait qu'Einstein avait lu le *Versuch* de Lorentz de 1895 (qui contient le temps local), qu'il était au courant des expériences sur l'entraînement de l'éther et qu'il avait lu *La science et l'hypothèse* de Poincaré, qui contenait une défense du principe de relativité et quelques considérations sur la mesure du temps et sur le caractère conventionnel de la simultanéité. Par ailleurs, il était probablement conscient de la transformation de Lorentz de 1904 et il avait probablement lu le mémoire de Poincaré de 1900 qui contient l'interprétation du temps local⁹. Il est donc possible que l'inspiration lui soit venue en méditant cette interprétation.

Si toutefois Poincaré avait été sa seule source, il n'aurait point éprouvé le besoin de renverser les concepts classiques d'espace et de temps et d'éliminer complètement l'éther. Il semblerait que son passage antérieur par une théorie de l'émission et peut-être aussi le concept de quanta lumineux aient facilité cette étape radicale. Mais la clef de l'originalité d'Einstein se trouve sans doute dans l'introduction qu'il donne à son mémoire de juin 1905 : il y dénonce, dans la théorie de Lorentz, l'existence d'asymétries dépourvues de contrepartie phénoménale. Ainsi la théorie de Lorentz donne-t-elle deux explications différentes du phénomène d'induction électromagnétique lors du mouvement relatif d'un conducteur et d'un aimant : par un champ électrique (\mathbf{E}) si c'est l'aimant qui se meut à travers l'éther, par un champ électromoteur ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$) dépourvu d'énergie si c'est le conducteur qui se meut. Einstein, contrairement à Poincaré, refusait une telle redondance dans la représentation théorique des phénomènes et exigeait que tous les référentiels inertiels soient traités sur le même pied, puisque qu'aucun effet physique ne permettait de les discerner. Il se situait ainsi dans la lignée de Mach et de Hertz, qui favorisaient l'économie et l'univocité de la représentation au dépend des intuitions acquises [9].

Non content de réformer les concepts d'espace et de temps, quelques mois plus tard Einstein remit en question le dogme classique de la conservation de la masse. En 1900, Poincaré avait noté que l'application de la conservation de l'énergie à l'émission de rayonnement conduisaient à des estimations différentes de l'impulsion de recul de la source, selon que le bilan était effectué par un observateur lié à la source ou par un observateur en mouvement dans la direction d'émission. Dans sa théorie de la relativité, Einstein se heurta à un paradoxe similaire. Supposons avec lui qu'une quantité $J/2$ d'énergie rayonnante soit émise simultanément par une source immobile dans deux directions opposées (et donc sans recul). Pour un observateur se mouvant à la vitesse u sur la ligne d'émission, l'énergie émise peut se calculer en appliquant une transformation de Lorentz aux champs électromagnétiques correspondants, ce qui donne :

$$J' = (1 - u^2/c^2)^{-1/2}(1 + u/c)J/2 + (1 - u^2/c^2)^{-1/2}(1 - u/c)J/2 \approx J(1 + u^2/2c^2) \quad (1.1)$$

⁹Il le cite en effet dans un article de 1906.

Autrement dit, l'énergie consommée par l'émetteur semble dépendre du mouvement de l'observateur qui l'apprécie. Einstein ne vit qu'une manière d'éviter cette violation du principe de relativité : admettre une diminution J/c^2 de la masse de la source lors du processus d'émission. En effet, une telle variation de masse implique que l'énergie cinétique de l'émetteur diminue de $-(1/2)(J/c^2)u^2$, conformément à l'excédent d'énergie rayonnante donné par la formule précédente [6, 15, 22].

De ce raisonnement particulier, Einstein inféra que la masse d'un corps dépendait de son contenu en énergie de manière tout à fait générale. Il nota aussi que des défauts de masse appréciables devaient correspondre aux énormes énergies impliquées dans les transformations radioactives. « *La chose est plaisante à considérer* », confia-t-il alors à son ami Conrad Habicht, « *mais Dieu n'est-il pas en train d'en rire et me mène-t-il par le bout du nez ? Ça, je suis incapable de le savoir.* »¹⁰

1.2 Thème de recherche 2 : microphysique théorique

Alors même qu'il abordait, autour de 1900, la question des rapports de la matière et de l'éther, Einstein s'enthousiasmait pour les théories moléculaires. Sa correspondance amoureuse des années 1899–1901 porte la trace de tentatives d'explications ioniques ou électroniques des relations entre la chaleur, l'électricité et le rayonnement. Il cherchait à comprendre les effets thermo-électriques comme un couplage entre le mouvement thermique et les forces électriques ; il évaluait la contribution du gaz d'électrons d'un métal à sa chaleur spécifique — d'où son intérêt pour la théorie de Drude ; et il imaginait que la chaleur spécifique d'isolants dépendit des vibrations d'électrons liés, ce qui la relierait au spectre d'absorption infrarouge et au rayonnement thermique.

En proposant des vérifications expérimentales de ces idées, Einstein espérait sans doute attirer l'attention de son professeur de physique, Heinrich Weber, qui était spécialiste du type pertinent de mesures thermiques. Il envoya aussi une lettre critique à Drude. N'obtenant point le soutien espéré, il se détourna temporairement de cette ligne de recherche et s'intéressa, de 1900 à 1902, à la détermination expérimentale de constantes moléculaires à partir des phénomènes de capillarité, d'électrochimie des solutions salines, et de transport dans les gaz. Dans ses deux premières publications, en 1901 et 1902, et dans une première thèse doctorale jamais soutenue, il identifiait les forces s'exerçant entre deux molécules à la superposition de forces centrales de la forme $c_i c_j F(r_{ij})$, où i et j sont deux atomes constituants de ces molécules, r_{ij} la distance qui les sépare, c_i et c_j des constantes caractéristiques de ces atomes, et F une fonction universelle. Cette hypothèse impliquait des relations entre les tensions superficielles de diverses substances (cas des liquides),

¹⁰Einstein à Habicht, été 1905, [4] vol. 3, extrait traduit dans [10] vol. 2 : pp. 59–60.

entre leurs potentiels électrochimiques (cas des solutés) ou leurs coefficients de transport (cas des gaz)¹¹.

Quelques spéculatives que fussent ces théories du jeune Einstein, elles lui permirent de mêler astucieusement des raisonnements thermodynamiques macroscopiques et des raisonnements mécaniques microscopiques. Ce jeu d'échelles le poussa sans doute à approfondir la *Théorie des gaz* de Boltzmann, qu'il avait lue en septembre 1900. Dans ses trois publications suivantes (1902 à 1904), il proposait de fonder toute la thermodynamique statistique sur une base incontestable et très générale. Selon lui, Boltzmann s'était abondamment servi de probabilités sans pour autant donner à ce concept une signification physique précise. Pour combler ce déficit, Einstein définissait la probabilité d'un état d'un système par la fraction de temps passée par le système dans cet état au bout d'une évolution très longue [2, 23–25].

Pour rendre compte de l'uniformité du comportement thermodynamique d'un système macroscopique fermé, Einstein admettait que la probabilité ainsi définie était la même pour tout état initial compatible avec une valeur donnée des invariants globaux (quantité de mouvement, moment cinétique et énergie). Autrement dit, il supposait que la moyenne temporelle $\bar{\Omega}$ d'une propriété quelconque Ω du système était la même pour tout état initial ainsi choisi. Pour un ensemble stationnaire de copies du système soumis à la même restriction, cette hypothèse (ergodique faible) implique

$$\bar{\Omega} = \langle \bar{\Omega} \rangle = \overline{\langle \Omega \rangle} = \langle \Omega \rangle \quad (1.2)$$

où $\langle \ \rangle$ désigne la moyenne d'ensemble. Ainsi la moyenne temporelle peut-elle être remplacée par une moyenne sur un ensemble stationnaire. De surcroît, l'unicité supposée de la moyenne temporelle implique l'unicité de la moyenne d'ensemble.

Comme Einstein souhaitait le fondement le plus général possible, il n'exigeait pas la structure hamiltonienne de la dynamique du système. Il se contentait d'admettre l'existence d'un choix de coordonnées tel que le volume d'un élément d'espace des phases soit invariant dans le temps. Il est alors évident que l'ensemble défini par une distribution uniforme sur l'hypersurface associée aux invariants globaux est stationnaire. Dans le cas d'un système contenu dans un récipient rigide, le seul invariant global est l'énergie, et l'ensemble stationnaire pertinent correspond à la distribution microcanonique de Gibbs. Einstein montrait plus loin qu'un petit sous-ensemble d'un tel ensemble était distribué canoniquement, avec la densité $\rho = e^{-\beta H}/Z$, H étant la fonction énergie du système, Z un facteur de normalisation, et β un coefficient identifié à $1/kT$ (où T désigne la température du gaz parfait, et k le rapport de la constante des gaz parfaits au nombre d'Avogadro). Il définissait travail, chaleur et entropie à partir des déformations lentes d'un tel ensemble. Il reliait l'entropie d'un macro-état à sa probabilité microcanonique, et déduisait la loi de croissance de l'entropie d'un système isolé de l'hypothèse de la probabilité toujours croissante de ses états.

¹¹Voir [4] vol. 1 : pp. 264–266 ; vol. 2 : pp. 3–8.

Mis à part l'admission de microdynamiques non hamiltoniennes, rien de tout cela n'était original. Sans qu'Einstein le sût, des considérations très similaires se trouvaient disséminées dans divers écrits de Boltzmann ; et Josiah Willard Gibbs avait offert, dans sa *Mécanique statistique* de 1902, une magnifique étude systématique des ensembles statistiques. Einstein se démarquait cependant de ses prédécesseurs en retournant constamment à l'interprétation physique des probabilités thermodynamiques comme fraction de temps passée par le système dans tel ou tel de ses états. Cette interprétation mettait l'accent sur les fluctuations du système autour de son état d'équilibre, et faisait ainsi des écarts au comportement thermodynamique l'essence de la mécanique statistique, alors que Boltzmann et Gibbs insistaient sur le caractère négligeable de tels écarts [26].

À la fin de son mémoire de 1904, Einstein se servit de l'expression

$$\overline{(E - \bar{E})^2} = kT^2 d\bar{E}/dT \quad (1.3)$$

des fluctuations quadratiques moyennes de l'énergie E d'un système thermostaté pour faire de la constante k la mesure de la « stabilité thermique » d'un système. Il jugea « très intéressant » le fait que cette expression ne fasse intervenir que des grandeurs purement thermodynamiques (l'énergie interne \bar{E} et la température T). Plus généralement, il interprétait la relation de Boltzmann

$$S = k \ln W \quad (1.4)$$

entre entropie et probabilité comme un pont entre une grandeur thermodynamique mesurable (ici l'entropie) et la probabilité W de fluctuations reflétant la microdynamique du système.

Pour déterminer la constante k et le nombre d'Avogadro, il suffisait donc d'imaginer une situation physique dans laquelle les fluctuations fussent accessibles à l'expérience. En 1904, Einstein n'en connaissait point. Mais il imagina que dans un corps noir de dimensions L de l'ordre de la longueur d'onde moyenne λ_m du rayonnement thermique, les fluctuations quadratiques relatives devaient être de l'ordre de l'unité en raison des ondulations de ce rayonnement. Compte tenu de la loi de Stefan $\bar{E} = L^3 \sigma T^4$, cette condition conduit à la relation $\lambda_m \approx (4k/\sigma)^{1/3} T^{-1}$, qu'Einstein jugea compatible avec les mesures du rayonnement noir et la valeur alors admise de k . Le succès de cet argument le convainquit du rôle que pouvaient jouer les fluctuations dans l'exploration microphysique, pour la matière comme pour le rayonnement.

En 1905, Einstein prit conscience de l'existence et de l'observabilité des fluctuations de particules suspendues dans un liquide. Ayant lu *La Science et l'hypothèse*, il avait peut-être noté l'allusion que faisait Poincaré aux travaux du Lyonnais Louis-George Gouy, qui tendaient à démontrer l'origine thermocinétique du mouvement brownien. Mais l'intérêt d'Einstein pour ce problème semble plutôt dériver de sa thèse doctorale d'avril 1905, dans laquelle il se proposait de déterminer des dimensions moléculaires et le nombre d'Avogadro à partir des propriétés de viscosité et de diffusion de l'eau sucrée. Par un

raisonnement purement hydrodynamique, il dérivait d'abord la relation

$$\mu^* = \mu(1 + f) \quad (1.5)$$

entre la viscosité μ^* de la solution, la viscosité μ du solvant, et la fraction de volume f occupée par le soluté. Puis il établissait, comme on va le voir, la relation

$$D = RT/6\pi\mu Na \quad (1.6)$$

entre le coefficient D de diffusion du soluté, la constante R des gaz parfaits, la viscosité μ du solvant, le nombre d'Avogadro N et le rayon a des molécules du soluté. De ces deux relations et des données empiriques existantes, il extrayait ensuite les valeurs de N et a [2, 27]¹².

Pour dériver la seconde relation, Einstein équilibrait la résistance visqueuse d'une molécule sphérique avec l'action de la pression osmotique sur la surface de cette molécule :

$$6\pi\mu av = -(1/\nu N)d(\nu RT)/dx \quad (1.7)$$

où v est la vitesse de la molécule, ν la concentration molaire de soluté, et x la coordonnée par rapport à laquelle la concentration varie. Comme Einstein le notait, cette équation ne va pas de soi, car du point de vue de la théorie cinétique la pression osmotique n'est qu'une force apparente, résultant d'actions moléculaires stochastiques et donc bien différente d'une force extérieure réelle (électrique ou gravifique par exemple). Sa justification ultime repose sur la mécanique statistique. En effet, suivant une loi de Boltzmann, la concentration d'une substance soumise à un champ de force de potentiel V est proportionnelle à $e^{-V/kT}$, ce qui revient formellement à dire que la force est opposée au gradient de la pression osmotique.

Dans ce raisonnement, Einstein traitait les molécules du soluté comme des corps macroscopiques soumis à des forces apparentes. Il était donc naturel qu'il s'interrogeât sur le cas d'une suspension. Du point de vue de la thermodynamique macroscopique, notait-il, la seule force agissant sur les particules en suspension est la force visqueuse (en sus de la gravité). Du point de vue de la thermodynamique statistique, une suspension ne diffère d'une solution que par l'échelle des particules suspendues. Elle doit donc être soumise elle aussi à des effets de diffusion, toujours donnés par la formule $D = RT/6\pi\mu Na$. Cette diffusion, tout comme dans le cas du soluté, doit être comprise comme un effet stochastique des collisions des molécules du fluide environnant (toute interaction directe entre les particules est négligée).

Le but de l'article d'Einstein reçu le 11 mai 1905 par *Annalen der Physik* était d'explicitier l'interprétation stochastique de la diffusion des particules en suspension, et d'en déduire une nouvelle manière d'atteindre le nombre d'Avogadro. Considérons, avec Einstein, un temps τ très bref devant le temps caractéristique de diffusion, mais suffisamment long pour que les déplacements

¹²Comme Ludwig Hopf le découvrit en 1911, la formule (1.5) comporte une erreur de calcul et doit être remplacée par $\mu^* = \mu(1 + 5f/2)$.

d'une des particules au cours d'intervalles successifs de durée τ soient statistiquement indépendants. Soit $\varphi(\Delta)d\Delta$ la probabilité pour que le déplacement d'une particule au bout du temps τ soit compris entre Δ et $\Delta + d\Delta$; et $f(x, t)$ la distribution spatiale (unidimensionnelle) des particules à l'instant t . La formule

$$f(x, t + \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x + \Delta, t)\varphi(\Delta)d\Delta \quad (1.8)$$

développée au premier ordre en τ et au second ordre en Δ , conduit à l'équation de diffusion

$$\frac{\partial f}{\partial t} = D \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (1.9)$$

avec

$$D = \frac{1}{2\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 \varphi(\Delta)d\Delta \quad (1.10)$$

Le déplacement quadratique moyen des particules au bout du petit temps τ se trouve ainsi relié au coefficient de diffusion. Cette relation reste vraie pour des temps arbitrairement longs, comme l'indique la solution

$$f(x, t) = \frac{n}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt} \quad (1.11)$$

de l'équation de diffusion (9) pour la condition initiale $f(x, 0) = n\delta(x)$. La mesure du déplacement quadratique moyen d'une particule brownienne permettrait donc d'accéder au nombre d'Avogadro N via l'expression $D = RT/6\pi\mu Na$ du coefficient de diffusion. En conclusion de son article, Einstein exhortait les expérimentateurs à étudier cette « question importante pour la théorie de la chaleur » [2, 28].

On connaît l'écho de ce mémoire d'Einstein (et des travaux indépendants de Marian von Smoluchowski), particulièrement en France, avec les expériences qui valurent à Jean Perrin le prix Nobel et avec l'importante théorie stochastique de Paul Langevin (1908). Le physicien d'aujourd'hui y trouve en germe la relation fluctuation-dissipation et la notion de processus Markovien. Pour les contemporains d'Einstein, le mouvement brownien offrait non seulement une nouvelle méthode de mesure du nombre d'Avogadro, mais encore il donnait aux fluctuations thermodynamiques une réalité physique qu'elles n'avaient point auparavant. Un peu de fumée et un microscope suffisaient à révéler d'incessantes violations de la thermodynamique classique, pour la plus grande joie du jeune iconoclaste qu'était alors Einstein.

1.3 Thème de recherche 3 : le rayonnement du corps noir

De l'opinion d'Einstein, ses mémoires de 1905 sur le mouvement brownien et sur la relativité n'étaient pourtant pas les plus révolutionnaires.

Seul le premier mémoire du triptyque, celui sur les quanta lumineux, méritait ce qualificatif. Le principal contexte en était le problème du rayonnement thermique, qui se situait à la croisée de l'intérêt d'Einstein pour les phénomènes thermiques, l'électromagnétisme, leurs interrelations et la microphysique sous-jacente. Dès 1901, Einstein s'intéressa à la théorie que Planck prétendait donner de ce phénomène¹³.

Vers la fin du XIX^e, le rayonnement thermique était l'objet de nombreuses études expérimentales et théoriques, en raison du développement des lampes à incandescence, de soucis métrologiques et de l'attrait théorique qu'exerçait un phénomène mêlant chaleur et lumière. On savait, depuis Gustav Kirchhoff (1860), que les lois de la thermodynamique impliquaient l'universalité du spectre du rayonnement émis par un « corps noir », c'est-à-dire un corps totalement absorbant et maintenu à température constante. Concrètement, ce spectre est celui du rayonnement contenu dans une cavité absorbante thermostatée. Son universalité attirait naturellement les métrologues et les théoriciens. Max Planck espérait le dériver théoriquement au bout d'une étude de l'évolution irréversible d'un système d'oscillateurs électriques (« résonateurs ») en interaction avec le rayonnement confiné dans une cavité aux parois idéalement réfléchissantes. L'échec de cette approche le conduisit, vers la fin de 1900, à se tourner vers la relation de Boltzmann entre entropie et probabilité [8, 26].

Planck définissait le macro-état d'un ensemble de N résonateurs de fréquence ν par leur énergie moyenne U , et un micro-état par la donnée des énergies de chaque résonateur. Comme Boltzmann, il donnait à ces énergies des valeurs discrètes, multiples entiers de l'élément ε , afin d'obtenir une valeur finie et définie du nombre W de micro-états compatibles avec un macro-état donné. Posant $P = NU/\varepsilon$, cela donne

$$W = (N + P - 1)! / (N - 1)! P! \quad (1.12)$$

Dans la limite de grand N , la formule de Boltzmann $S = k \ln W$ et la relation thermodynamique $dS/dU = 1/T$ donnent alors

$$U = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT} - 1} \quad (1.13)$$

Par ailleurs, en appliquant la théorie de Maxwell aux interactions entre résonateur et ondes électromagnétiques de phase aléatoire et de fréquence accordée, Planck avait obtenu la relation

$$u_\nu = (8\pi\nu^2/c^3)U \quad (1.14)$$

entre l'énergie moyenne (temporelle) U du résonateur et la densité spectrale énergétique u_ν du rayonnement noir. Il savait aussi, d'après un raisonnement thermodynamique dû à Wien, que la fonction $u_\nu(T)$ était nécessairement de

¹³Voir Einstein à Marić, 4 avril 1901, [4] vol. 1 : pp. 284–286.

la forme $\nu^2 f(\nu/T)$. Il fallait donc prendre $\varepsilon = h\nu$, ce qui conduit à la loi de Planck [29]

$$u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.15)$$

Planck se réjouit de l'excellent accord de cette formule avec les mesures les plus récentes de ses amis spectroscopistes berlinois. Il se félicita aussi d'établir, grâce à la formule de Boltzmann et à la constante k , un pont entre théorie des gaz et théorie du rayonnement, et il en tira une nouvelle détermination du nombre d'Avogadro. Sa démonstration restait cependant obscure. Pourquoi les éléments d'énergie persistaient-ils dans l'expression finale de l'entropie d'un résonateur, alors que dans les considérations analogues de Boltzmann (pour les gaz) toute trace de discrétisation s'évanouissait au bout des calculs ?

Planck avait certes des raisons, liées à une réinterprétation très particulière de la théorie de Boltzmann, d'attendre une telle asymétrie. Mais il était le seul à les comprendre. Einstein, qui ne se laissait impressionner par aucune autorité, jugea que Planck avait erré dans son application de la méthode de Boltzmann. Selon lui, cette méthode devait nécessairement conduire à la valeur kT de l'énergie moyenne d'un résonateur, et donc à la formule spectrale

$$u_\nu = (8\pi\nu^2/c^3)kT \quad (1.16)$$

Le succès de Planck dans la détermination de la valeur de k ne dépendait que de la validité approximative de cette dernière formule dans le domaine des basses fréquences. Pour rendre compte du reste du spectre, il fallait nécessairement sortir du cadre de l'électrodynamique classique.

Einstein exprima publiquement cette opinion dans l'introduction de l'article reçu le 18 Mars 1905 par *Annalen der Physik* [30] et intitulé : « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. » Il n'y mentionnait toutefois pas le nom de Planck, ayant appris à ses dépens qu'un peu de prudence diplomatique pouvait aider à sa carrière. Une fois constaté l'échec de la détermination de la probabilité thermodynamique W à partir de la théorie classique du rayonnement, il se proposait ensuite de faire l'inverse, c'est-à-dire d'inférer les éléments d'une nouvelle théorie du rayonnement à partir de l'expression de W requise par l'expérience [2, 26, 30, 31].

Dans le domaine des hautes fréquences, le spectre du rayonnement noir est approximativement représenté par la loi de Wien

$$u_\nu = \alpha\nu^3 e^{-\beta\nu/T} \quad (1.17)$$

Pour un volume V et une énergie $E = u_\nu V d\nu$, l'entropie d'un tel rayonnement est

$$S = \int_0^E dE'/T' = -\frac{E}{\beta\nu} \ln(E/\gamma V) \quad (1.18)$$

avec $\gamma = e\alpha\nu^3 d\nu$. Si le volume passe de V_0 à V , l'entropie varie de

$$S(V) - S(V_0) = \ln(V/V_0)^{E/\beta\nu} \quad (1.19)$$

Grâce à la formule de Boltzmann $S = k \ln W$, Einstein en déduit que la probabilité W d'une fluctuation du rayonnement par laquelle le rayonnement d'une cavité de volume V se trouve confiné dans le volume partiel V_0 , est donnée par

$$W = (V/V_0)^{E/k\beta\nu} \quad (1.20)$$

Cette expression, note Einstein, est celle qu'on attendrait si le rayonnement était constitué d'un nombre $E/k\beta\nu$ de quanta d'énergie indépendants $k\beta\nu$ ¹⁴.

D'autres n'auraient vu là que simple coïncidence formelle. Mais Einstein, sur la base de son interprétation physique des probabilités thermodynamiques, croyait fermement que les fluctuations révélaient la structure dynamique sous-jacente. Il n'hésita donc pas à supposer qu'un rayonnement dilué se comportait, dans son interaction avec la matière, comme s'il était constitué de quanta indépendants. Dans le cas de l'effet photoélectrique, l'éjection d'un électron du métal par la lumière incidente n'est alors possible que si l'énergie des quanta incidents excède le travail d'extraction P . Et l'énergie cinétique des photo-électrons est la différence $k\beta\nu - P$ entre cette énergie et ce travail. Dans des expériences qu'Einstein admirait, Philipp Lenard avait bel et bien observé l'existence d'un seuil de fréquence et avait établi que l'énergie des électrons émis au-delà de ce seuil ne dépendait que de la fréquence du rayonnement incident.

L'année suivante, Einstein montra que la loi de Planck résultait d'une extension naturelle de la thermodynamique statistique, à condition de supposer que l'énergie des résonateurs de Planck ne pouvait être qu'un multiple entier du quantum $h\nu$, conformément à l'hypothèse des quanta lumineux. Pour qui croit que Planck admettait la quantification discrète des résonateurs dès 1900, cette remarque d'Einstein manque d'intérêt. Mais en réalité Planck n'avait introduit les éléments d'énergie que dans un calcul d'entropie combinatoire, sans ce prononcer sur la signification dynamique de cette étape. Comme Boltzmann, il n'envisageait les énergies discrètes qu'en tant que fiction, et préférerait imaginer des « domaines élémentaires » équiprobables sur l'axe des énergies. Dans sa conférence Nobel de 1920, ce savant intègre attribua à Einstein la paternité d'une quantification vraiment *physique* [8, 32, 33] :

Bien que [la constante h] fût indispensable – car elle seule permettait de déterminer la taille des « domaines élémentaires » de la probabilité – elle s'avéra récalcitrante à toute tentative d'intégration dans la théorie classique. . . Bientôt, l'échec de telles tentatives. . . ne laissa plus de doute : soit le quantum d'action n'était qu'une quantité fictive, soit la dérivation de la loi du rayonnement [noir] reposait sur une idée vraiment physique. . . L'expérience a décidé en faveur de la seconde alternative. Mais la science ne doit pas cette décision prompte et indubitable aux tests de la loi de distribution du rayonnement thermique, et encore moins à ma dérivation particulière de cette loi ; elle le doit aux progrès incessant des chercheurs qui se sont servi du quantum d'action dans leurs recherches. A. Einstein fit la première percée dans ce domaine.

¹⁴Dans les notations de Planck, qu'Einstein évite soigneusement, $k\beta\nu = h\nu$.

1.4 Les clefs du succès

Quelle que fût la réception immédiate des mémoires d'Einstein de 1905, nous pouvons rétrospectivement juger qu'ils inauguraient trois domaines de la physique : la théorie de la relativité, la théorie des processus stochastiques et la physique quantique. Einstein était-il seul sur ce triple front ? Se démarquait-il vraiment de la physique antérieure ? L'*annus mirabilis* 1905 est-elle l'année d'Einstein ?

Quand on y regarde de près, aucune des innovations d'Einstein n'était complètement isolée et elles s'appuyaient toutes sur des avancées antérieures de ses aînés. Cependant, dans chaque cas, Einstein dépassait ses contemporains par l'ampleur et la radicalité de ses points de vue. Bien que Poincaré proposât, en même temps qu'Einstein, une théorie de la relativité empiriquement et formellement équivalente à la théorie d'Einstein, seul Einstein se permit de redéfinir les concepts d'espace et de temps. Bien que Smoluchowski aboutît à une analyse du mouvement brownien voisine de celle d'Einstein, seul Einstein poursuivait une stratégie générale d'exploration du microcosme à l'aide des fluctuations thermodynamiques ; les « révolutionnaires » quanta lumineux en sont un des remarquables produits. Même si, à cette époque des théoriciens comme Lorentz, Ehrenfest et Planck commençaient à douter de la capacité de la physique classique à rendre compte du rayonnement noir, Einstein fut le premier à afficher une certitude à cet égard. Pendant longtemps, il fut seul à croire que la nature continue de l'énergie rayonnante était en question. L'originalité et la profondeur de ses vues ne fait donc pas de doute, même si l'on fait la part du mythe.

Il est naturel de s'interroger sur les clefs d'un tel succès. Si tant est que l'on puisse les identifier, la meilleure façon de le faire est sans doute de comparer les approches d'Einstein et de ses contemporains sur des problèmes similaires. Ainsi se dégagent quelques singularités.

Il y a d'abord, de la part du jeune Einstein, un certain refus du formalisme et une volonté de donner un sens physique à tous les éléments formels d'une théorie. À une époque où l'électrodynamique de Lorentz tendait à devenir, dans les mains de son auteur et dans celles des mathématiciens de Göttingen, un lieu d'exhibition de virtuosité mathématique, Einstein préférait s'interroger sur la signification physique des concepts de base. De même, Einstein donnait un sens physique aux fluctuations thermodynamiques que ses prédécesseurs préféraient noyer dans un formalisme probabiliste partiellement interprété.

On est aussi frappé par la conscience épistémologique du jeune Einstein. Il n'était certes pas seul, au tournant du siècle, à avoir lu Hume, Mach, Boltzmann et Poincaré ; et il n'était pas seul à comprendre la faillibilité de nos concepts les mieux établis. Mais nul ne se défiait plus que lui des dogmes de la physique contemporaine. Il s'interrogeait sans cesse sur l'ancrage empirique des concepts fondamentaux de la physique, tantôt pour les réviser (l'espace et le temps), tantôt pour les consolider (les atomes). Il exigeait des théories physiques qu'elles représentent les phénomènes de manière univoque,

sans redondance inutile, avec le maximum d'homogénéité et de cohésion structurelle. C'est sur ce point que sa version de la théorie de la relativité diffère de celles de Poincaré et de Lorentz [9].

Einstein se singularisait aussi par sa volonté de se placer systématiquement dans les zones les plus turbulentes de la physique de son époque. Il méprisait toute routine et cherchait à trancher les grandes controverses à propos de l'existence des atomes et du rapport entre l'éther et la matière. Il était attentif aux faits étranges comme les expériences de Lenard sur l'effet photoélectrique, les violations de la loi de Dulong et Petit pour les chaleurs spécifiques des solides, l'expérience de Michelson et Morley, ou encore le mouvement brownien. Il suivait de près les innovations théoriques comme celles de Drude pour la conduction métallique, de Lorentz pour la théorie de l'électron et de Planck pour le corps noir. Il n'avait pas peur de mener simultanément des réflexions sur plusieurs fronts apparemment éloignés les uns des autres.

Enfin, Einstein recherchait une unité et une simplicité fondamentales de la physique. C'est sans doute en cela qu'il était le moins original. Les grands maîtres de cette époque partageaient cette quête. Presque tous approuvaient l'idée de Maxwell et de Helmholtz de soumettre l'ensemble de la physique au principe de moindre action. Certains, comme Lorentz et surtout Max Abraham cherchaient à donner un fondement électromagnétique à l'ensemble de la physique, y compris la mécanique et la théorie de la gravitation. D'autres, comme Wilhelm Ostwald, pensaient tout pouvoir déduire du principe de conservation de l'énergie. Drude et Planck se flattaient d'établir des ponts entre l'optique, l'électromagnétisme et la théorie de la chaleur, l'un grâce à l'idée du gaz d'électron dans les métaux, l'autre par une étude thermostatique du couplage entre oscillateurs et rayonnement. Suivant une distinction de Poincaré reprise par Einstein, certains préféraient unifier la physique par des principes généraux issus de l'expérience, d'autres par la construction d'une image hypothétique du monde [5].

Ce qui singularise Einstein dans sa quête unitaire, c'est plutôt la liberté de choix du mode d'unification. Dans le cas de l'électrodynamique des corps en mouvement, où l'approche constructive dominait alors, il préféra une théorie encadrée par de nouveaux principes. Pour la thermodynamique, il défendit la démarche constructive de Boltzmann, tout en envisageant une révision radicale de la dynamique sous-jacente. Soulignons aussi la tendance d'Einstein à penser l'unité de manière concrète, en imaginant des processus physiques qui mêlent diverses forces et diverses échelles. Par exemple, dans ses mains les résonateurs idéaux de Planck devenaient des oscillateurs moléculaires réels susceptibles d'entrer en collision avec les molécules d'un gaz environnant, ou encore d'interagir dans un réseau cristallin. Cette vision concrète excluait le genre de violation de l'équipartition de l'énergie admis par Planck ; et elle permettait de mettre en rapport chaleurs spécifiques et spectres d'absorption. Afin de mêler les échelles microscopique et macroscopique, Einstein introduisait d'autres dispositifs concrets : le corps noir de dimensions comparables à la longueur d'onde moyenne, et la suspension brownienne.

Ces quelques remarques et l'histoire qui précède permettent de saisir l'unité du triptyque de 1905. L'article sur les quanta lumineux et celui sur le mouvement brownien procèdent évidemment du même principe de la réalité physique des fluctuations thermodynamiques. Dans le premier cas, une estimation thermodynamique de telles fluctuations permet d'inférer la structure du rayonnement responsable ; dans le second cas l'observation des fluctuations permet d'accéder au nombre d'Avogadro, tout en validant l'interprétation statistique du second principe de la thermodynamique. En tête de l'article sur les quanta lumineux, Einstein critiquait l'asymétrie classique entre rayonnement ondulatoire et matière corpusculaire, et voyait dans l'introduction d'aspects corpusculaires du rayonnement un premier pas vers une image plus homogène du monde. Cette belle unité s'étend plus difficilement à l'article sur la relativité, qui répondait à des préoccupations de nature différente. On peut cependant remarquer que dans ce travail Einstein ouvrait la porte aux conceptions quantiques, car sa nouvelle cinématique était indépendante de la théorie de Maxwell-Lorentz et sa dynamique relativiste s'affranchissait de tout modèle constitutif de l'électron [34].

Cette unité des travaux de 1905 prit une forme concrète en 1909, quand Einstein présenta l'analyse du mouvement brownien d'un miroir immergé dans du rayonnement thermique. Cette étude impliquait l'analyse des processus stochastiques inaugurée dans l'article sur le mouvement brownien ; elle faisait aussi intervenir la relativité et les transformations de Lorentz dans le calcul du freinage radiatif du miroir ; et enfin elle conduisait à attribuer une partie des fluctuations de quantité de mouvement du miroir à l'émission et à l'absorption de quanta lumineux [35].

1.5 Trois réceptions

L'unité voulue du triptyque d'Einstein n'empêcha pas ses lecteurs d'en juger les composantes séparément. L'article sur le mouvement brownien connut un succès presque immédiat et il suscita les travaux de Perrin qui levèrent les derniers doutes sur la réalité des atomes. L'article sur la relativité conquit assez rapidement les spécialistes de l'électrodynamique des corps en mouvement, grâce au soutien de Planck et grâce à l'élégance mathématique des contributions d'un ancien professeur d'Einstein, Hermann Minkowski. Mais certains experts, dont Lorentz, jugèrent inutile l'interprétation radicale que donnait Einstein des transformations de Lorentz. La relativité ne fut vraiment populaire qu'après que l'expédition d'Arthur Eddington permit, à la faveur d'une éclipse totale du soleil en 1919, de vérifier la déviation des rayons lumineux prédite par la relativité générale [2, 3].

Le plus contesté des articles d'Einstein fut sans doute celui sur les quanta lumineux, comme en témoigne le jugement formulé par Planck à l'occasion de la candidature d'Einstein à l'Académie de Berlin [36] :

En bref, on peut dire que, parmi les grands problèmes dont la physique moderne abonde, il n'en est guère qu'Einstein n'ait marqué de sa contribution. Il est vrai qu'il a parfois manqué le but lors de ses spéculations, par exemple avec son hypothèse des quanta lumineux ; mais on ne saurait lui en faire le reproche, car il n'est pas possible d'introduire des idées réellement nouvelles, même dans les sciences les plus exactes, sans parfois prendre des risques.

Les arguments d'Einstein en faveur des quanta lumineux n'avaient pas le pouvoir de conviction que les physiciens d'aujourd'hui leur attribuent. Ses plus éminents collègues, parmi lesquels Planck, Lorentz et Bohr, crurent y détecter des failles. L'optique ondulatoire était alors la mieux corroborée des théories physiques et il leur semblait difficile, voire impossible, de rendre compte du phénomène d'interférence dans une théorie corpusculaire de la lumière. Einstein ne savait lui-même résoudre les paradoxes liés à la double nature, corpusculaire et ondulatoire, du rayonnement. Jusqu'au début des années vingt, il fut le seul physicien de renom à croire aux quanta lumineux, et non sans quelques moments de doute (sur lesquels nous reviendrons dans un moment) [8, 26, 31].

Einstein joua pourtant un rôle capital dans l'émergence d'une nouvelle physique quantique : en contribuant à la conviction croissante d'un échec de l'électrodynamique classique dans le problème du corps noir, en établissant les lois de l'effet photoélectrique et en donnant, en 1907, une théorie quantique des chaleurs spécifiques des solides. Ce dernier point est particulièrement important, car il suscita un important programme expérimental de la part du thermochimiste Walther Nernst et aussi parce qu'Einstein y offrait une conception claire et radicale de la quantification de la dynamique moléculaire. Lors du premier congrès Solvay, dont Nernst détermina le thème quantique, bien des discussions tournèrent autour des idées lancées par le jeune Einstein. Nul n'approuva les quanta lumineux, mais tous admirèrent l'existence d'un nouveau type de discontinuité en physique, dont la nature restait fort obscure mais dont la nécessité générale ne faisait plus de doute [26, 31, 37, 38].

En somme, les travaux d'Einstein de 1905 inauguraient une nouvelle physique relativiste, atomiste et quantique. Ils marquaient aussi un tournant dans la carrière de ce jeune physicien, de l'identification des grands problèmes de son époque à la mise en place de puissantes stratégies de résolution. Au cours du demi-siècle qu'il lui restait à vivre, il déploya ces nouveaux moyens pour faire reculer aussi loin que possible les frontières de l'inconnu. Deux grandes questions s'imposèrent à son esprit : Comment construire une théorie relativiste de la gravitation ? Comment comprendre les mystérieux quanta ?

1.6 L'esprit relativiste

Quand Einstein et Poincaré, en 1905, traitaient de l'électrodynamique des corps en mouvement, ils rivalisaient avec les partisans d'une réduction de toute la physique, y compris la gravitation, à l'électromagnétisme. Et ils exigeaient

tous deux que toute théorie respectât la symétrie du groupe de Lorentz. Il ne faut donc pas s'étonner que Poincaré ait aussitôt tenté une modification covariante de Lorentz de la loi de Newton et qu'Einstein l'ait suivi de peu sur ce terrain, dans un article de synthèse de 1907. Einstein pensa d'abord à une théorie dans laquelle les graves seraient soumis à des forces dérivant d'un potentiel retardé proportionnel à leur masse (au repos). Mais il se rendit vite compte que dans ce cadre la composante verticale de l'accélération d'un grave en chute libre dépendait de sa vitesse horizontale, puisque la masse inertielle augmentait avec la vitesse sans que la masse gravitationnelle en dépendît. Cela contredisait un fameux principe de Galilée ainsi que l'égalité jusque là admise des masses inertielles et gravitationnelles [1, 2, 39].

Einstein eut alors « l'idée la plus heureuse de toute [sa] vie »¹⁵ : il admit de manière générale que tous les corps éprouvaient la même accélération dans un champ de gravitation et en inféra que dans un champ homogène tous les mouvements se déroulaient comme ils le feraient en l'absence de champ par rapport à un système de référence en mouvement uniformément accéléré. À travers cette hypothèse, qu'Einstein nomma plus tard « principe d'équivalence », tout champ de gravitation peut être localement compris comme un effet de perspective lié au mouvement (accéléré) du système de référence, de même qu'en relativité restreinte tout champ électromoteur d'induction peut-être compris comme un effet de perspective lié au mouvement (uniforme) du système de référence. Le principe de relativité se trouvait ainsi étendu à des systèmes de référence non galiléens.

En 1907, dans une éblouissante série d'expériences de pensée, Einstein se servit du principe d'équivalence pour montrer qu'une horloge plongée dans un potentiel gravitationnel Φ marchait $1 + \Phi/c^2$ fois plus vite qu'une horloge éloignée de toute masse. Il en conclut que la lumière provenant de la surface du soleil devait subir un décalage vers le rouge de l'ordre de deux millièmes. Il montra aussi que la vitesse de la lumière était affectée du même facteur $1 + \Phi/c^2$ et en conclut, par analogie avec un milieu transparent d'indice variable, que les rayons lumineux devaient être déviés lors de leur passage à proximité d'une masse importante. R.V. Pound et ses collaborateurs ne vérifièrent la première prédiction qu'en 1965 (par spectroscopie Mössbauer). Bien plus tôt, en 1919, l'expédition susmentionnée d'Arthur Eddington permit de confirmer la seconde et fit d'Einstein une vedette des médias [1, 2].

Pendant les quatre années qui suivirent les prédictions de 1907, Einstein cessa de publier sur la gravitation, sans doute parce que les quanta le préoccupaient alors davantage. Quant il y revint, en 1911, ce fut d'abord pour constater un certain vide conceptuel. Le principe d'équivalence suggérait une grande liberté dans le choix des coordonnées d'espace-temps. Mais alors ces coordonnées semblaient perdre toute signification physique : quel rapport pouvaient-elles avoir avec les mesures d'espace et de temps ? Par ailleurs, Einstein avait appris, dans le contexte des modèles rigides de l'électron, qu'une rotation

¹⁵Cette expression, extraite d'un manuscrit d'Einstein de 1919, est citée dans [2], p. 178.

uniforme du système de référence détruisait le caractère euclidien de la géométrie. En effet, le rapport de la circonférence au diamètre n'est plus égal à π , du fait que les règles tangentes à la circonférence sont soumises à la contraction de Lorentz alors que celles placées le long du diamètre ne le sont pas. Einstein savait aussi que dans le formalisme Minkowskien de la relativité restreinte, l'intervalle $ds^2 = dx^\mu dx_\mu$ associé à une variation dx_μ des coordonnées généralisait la distance euclidienne et jouait un rôle essentiel dans l'écriture lagrangienne des équations du mouvement d'un point matériel [2, 10 ; vol. 2].

En 1912, inspiré par une analogie avec la théorie des surfaces de Carl Friedrich Gauss, il eut l'idée d'identifier l'espace temps à une variété de métrique localement minkowskienne

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (1.21)$$

Il apprit alors de son ami mathématicien Marcel Grossmann qu'il existait une théorie mathématique de telles variétés, due à Bernhard Riemann. Grâce au calcul différentiel absolu de Tullio Levi-Civita, les deux hommes transposèrent les équations minkowskiennes de la relativité restreinte en équations covariantes sur une variété riemannienne. Puis ils cherchèrent à deviner les équations différentielles régissant la métrique $g_{\mu\nu}$. En raison du lien déjà connu entre le coefficient g_{00} de dilatation du temps et le potentiel de gravitation Φ , ils pensaient à une généralisation covariante de l'équation de Poisson $\Delta\Phi + \kappa\rho = 0$, faisant intervenir des dérivées du deuxième ordre de $g_{\mu\nu}$ et le tenseur d'énergie-impulsion $T_{\mu\nu}$ (dont la composante T_{00} est une densité d'énergie qui, divisée par c^2 , donne une masse gravitationnelle) [1, 2, 10 ; vol. 2, 40].

Dès 1913, ils considérèrent la possibilité

$$R_{\mu\nu} = \frac{\kappa}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1.22)$$

où $R_{\mu\nu}$ et R sont obtenus par contraction du tenseur de courbure de Riemann $R_{\mu\nu\rho\sigma}$.

Mais ils pensaient, à tort, que la limite newtonienne de cette équation ne redonnait pas l'équation de Poisson. « Le cœur lourd », ils levèrent cette difficulté en adoptant une équation qui n'était plus covariante que sous des transformations linéaires de coordonnées. Einstein comprenait combien cette restriction s'écartait de l'esprit du principe d'équivalence. Mais il crut pouvoir la justifier par des arguments physiques fondés sur son imparfaite compréhension du rôle des coordonnées dans la description d'une variété. Ce n'est qu'à la fin de 1915 qu'il comprit qu'une légère modification de l'équation (22),

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{\kappa}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1.23)$$

convenait parfaitement à son problème. En 1916, il publia la version définitive de la relativité générale ainsi que la preuve que cette théorie rendait compte d'une partie longtemps inexpliquée de l'avance du périhélie de Mercure [41].

Ce succès et plus encore la beauté de la théorie, convainquirent Einstein de sa vérité. À partir des années vingt, la plupart de ses recherches s'en inspirèrent. Sur la trace d'Eddington et de Hermann Weyl, il tenta diverses extensions, à cinq dimensions ou à connexion non métrique, en vue d'une théorie unitaire de la gravitation et de l'électromagnétisme. Il chercha aussi des solutions singulières des équations du champ qui puissent représenter des particules élémentaires. Jamais satisfait par la mécanique quantique, il espéra un temps expliquer la quantification par une surdétermination des équations des champs gravifiques et électromagnétiques. Jusqu'à la fin de sa vie, il rêva de réduire toutes les incongruités quantiques à une théorie des champs dans l'esprit de la relativité générale. Aucune de ses nombreuses tentatives n'aboutit au résultat désiré, malgré l'aide de puissants mathématiciens [2, 10 vol. 2].

À peine la théorie de la relativité générale fut-elle achevée, qu'Einstein comprit son potentiel cosmologique. Les équations d'Einstein introduisent un couplage global entre la géométrie de l'univers et la distribution de ses masses. Elles posent donc spontanément la question cosmologique de la structure d'ensemble de l'Univers. Dès 1917, Einstein se prononça pour un modèle statique, clos et homogène. L'homogénéité (à grande échelle) de la distribution de masses s'imposait par sa simplicité. La clôture de l'espace sur lui-même résultait du principe de Mach, selon lequel l'inertie ne pouvait dépendre que de la distribution de masses (dans un univers infini, l'inertie dépendrait aussi des propriétés asymptotiques de l'espace). Quant au caractère statique de l'Univers, il était compatible avec les données observationnelles de l'époque. Mais Einstein se rendit vite compte que ses équations n'admettaient pas de solution non triviale satisfaisant ces trois conditions. Il se résigna donc à introduire un nouveau terme $-\lambda g_{\mu\nu}$, dit cosmologique, dans le premier membre de l'équation (23) [10 ; vol. 2, 42].

La suite des événements ne fut guère favorable à cette hypothèse. En 1922, le mathématicien russe Alexander Alexandrovitch Friedman découvrit des solutions cosmologiques dynamiques des équations d'Einstein sans constante cosmologique. En 1923, Edwin Powel Hubble établit la loi de récession des galaxies qui porte son nom. En 1927, Georges Lemaître proposa un modèle d'univers en expansion. Enfin, en 1930 Eddington démontra l'instabilité de la solution statique d'Einstein. Secoué par cette fatale série, en 1931 Einstein se rétracta [44] :

Dans l'état actuel de nos connaissances, le fait d'une densité de matière différente de zéro ne doit pas être mis en relation avec une courbure spatiale, mais avec une expansion spatiale. Naturellement, nous ne voulons pas dire par là qu'une telle courbure (positive ou négative) n'existe pas. Mais nous n'avons, pour le moment, aucun indice de son existence.

Par là-même, Einstein renonçait au principe de Mach. Comme il le reconnut plus tard, ce principe n'a vraiment de sens que dans la mesure où l'espace n'a pas de réalité indépendante des corps qui le meublent. Mais la relativité générale affirme justement le caractère physique et dynamique de l'espace [43].

Le sort de la constante cosmologique illustre bien la difficulté des applications cosmologiques de la relativité générale, même pour son génial fondateur. L'impénétrabilité des mathématiques impliquées poussa souvent Einstein à injecter une part d'intuition dans ses déductions, ou à généraliser un peu hâtivement des résultats partiels. Ainsi, en 1939, il crut pouvoir affirmer l'impossibilité de l'effondrement gravitationnel d'un nuage de poussières (de symétrie sphérique) au-delà du rayon de Schwarzschild. Il croyait par là démontrer l'impossibilité de construire physiquement la « singularité » de la solution sphériquement symétrique que Karl Schwarzschild avait donné aux équations d'Einstein dès 1915. Mais l'analyse d'Einstein admettait le caractère statique du champ engendré par les poussières. Dans la même année, John Robert Oppenheimer et Hartland Snyder, qui ne faisaient pas cette supposition gratuite, aboutirent à la conclusion contraire en montrant que les particules du nuage traversaient le rayon de Schwarzschild lors de l'effondrement. Il fallut néanmoins attendre les années soixante pour que se développe l'étude des « trous noirs ». Einstein n'était plus là ([10] vol. 3 : p. 58).

1.7 L'énigme quantique

Dès 1905, Einstein pensait faire porter la quantification sur le rayonnement-même, plutôt que sur le mécanisme de son interaction avec la matière. Néanmoins, dans les trois années suivantes, il préféra explorer les conséquences de la quantification de la matière en développant une nouvelle théorie des chaleurs spécifiques des solides. Il revint à la structure du rayonnement en 1909, à l'occasion d'une conférence prononcée à Salzbourg devant l'élite de la physique théorique de l'époque. Rappelons qu'en 1905 sa suggestion des quanta lumineux s'appuyait sur une étude des fluctuations d'un rayonnement noir de faible densité (obéissant à la loi de Wien). En 1909, il s'affranchit de cette limitation en appliquant à un rayonnement distribué suivant la loi de Planck la formule (3) pour les fluctuations quadratiques moyennes de l'énergie d'un système thermostaté. Cela donne

$$\overline{(E - \bar{E})^2} / \bar{E}^2 = 1/(\bar{E}/h\nu) + 1/(8\pi V\nu^2 d\nu/c^3) \quad (1.24)$$

où E désigne l'énergie du rayonnement contenu dans le volume V et dans l'intervalle spectral $d\nu$ [26, 31, 45, 46].

Le premier terme du second membre est l'inverse du nombre moyen de quanta $h\nu$ dans ce rayonnement, et s'explique aisément selon l'image d'un gaz de quanta lumineux indépendants. En revanche, le second terme, où l'on reconnaît l'inverse du nombre de modes propres d'une cavité de volume V dans l'intervalle spectral $d\nu$, correspond aux interférences d'un rayonnement ondulatoire dont les phases sont aléatoirement distribuées. Plus concrètement, dans l'argument du « miroir brownien » mentionné plus haut, Einstein montrait que les fluctuations de vitesse d'un miroir plongé dans du rayonnement

noir se composaient encore de deux termes, l'un ondulatoire, l'autre corpusculaire. Ce résultat lui permit d'augurer comme suit [46] (p. 817) :

Je pense que la prochaine phase du développement de la physique théorique nous apportera une sorte de fusion de la théorie ondulatoire et de la théorie de l'émission [corpusculaire].

Einstein venait lui-même d'explorer une théorie des champs dans laquelle électrons et quanta lumineux devait apparaître comme des singularités influencées par le champ environnant. L'échec de telles tentatives, et les nombreuses objections reçues d'autres théoriciens (surtout de Lorentz), l'amènèrent à douter des quanta lumineux pour quelques temps. En mai 1911, il écrit à son ami Michele Besso : « *Je ne me demande plus si ces quanta existent réellement. Et je n'essaie plus de les construire car je sais maintenant que mon cerveau n'en est pas capable* ». En décembre 1911, une lettre à Ludwig Hopf le montre encore plus sceptique : « *Les quanta certes marchent comme ils devraient, mais ils n'existent pas plus... que l'éther immobile*¹⁶ ».

Dans les deux années suivantes, Einstein travailla surtout à la théorie de la gravitation. Dans le domaine quantique, il se contenta de montrer que certains résultats réputés quantiques pouvaient s'obtenir sans aucune quantification. C'est probablement le succès de la théorie atomique de Niels Bohr, publiée en 1913, qui le fit retourner aux quanta purs et durs. Bohr fondait sa théorie sur l'hypothèse qu'un atome ou une molécule ne pouvait durablement exister que dans une série discrète d'états stationnaires et qu'il ne pouvait interagir avec le rayonnement que par des sauts brusques d'un tel état à un autre. De surcroît, il admettait qu'en première approximation la mécanique ordinaire s'appliquait à l'interaction coulombienne entre les électrons et le noyau d'un atome. Afin de retrouver le spectre de l'atome d'hydrogène, il eut enfin l'audace d'admettre que la fréquence du rayonnement émis ou absorbé dans un saut quantique n'était plus donnée par la fréquence de rotation de l'électron dans l'état initial mais s'obtenait en divisant la variation d'énergie de l'atome par la constante de Planck [8, 31, 48].

Einstein vit dans cette conception des interactions entre atome et rayonnement une opportunité pour une théorie statistique qui lui permit de résoudre une contradiction persistante de la théorie du rayonnement noir. Les dérivations antérieures de la loi de Planck maintenaient la relation classique $u_\nu = (8\pi\nu^2/c^3)U$ entre l'énergie moyenne U d'un résonateur électrique et la densité spectrale énergétique u_ν du rayonnement noir, tout en quantifiant l'énergie de ce résonateur pour les besoins du calcul d'entropie. Pour lever cette contradiction, il fallait une nouvelle théorie quantique de l'interaction entre résonateur et rayonnement. C'est ce qu'Einstein se proposa de faire en 1916, dans le cas plus général d'un atome de Bohr émettant et absorbant du rayonnement [8, 31, 49, 50].

¹⁶Einstein à Besso [mai 1911], dans « Einstein à Hopf » [décembre 1911], Einstein Archive, Jerusalem.

Par analogie avec un oscillateur classique rayonnant spontanément, ou interagissant avec un rayonnement accordé en phase ou en opposition de phase, Einstein admit trois processus quantique d'interaction : émission spontanée, émission induite et absorption, de probabilités par unité de temps données par les coefficients A_m^n , $\rho_\nu B_n^m$, $\rho_\nu B_m^n$, où n et m dénotent les deux niveaux d'énergie concernés, et ρ_ν la densité d'énergie du rayonnement de fréquence ν accordée à la transition entre ces deux niveaux. L'équilibre cinétique d'un ensemble d'atomes interagissant avec du rayonnement suivant ces lois statistiques n'est alors compatible avec leur équilibre thermodynamique que si $B_n^m = B_m^n$, $A_m^n/B_m^n = 8\pi h\nu^3/c^3$, $E_n - E_m = h\nu$ et $\rho_\nu = u_\nu$ (loi de Planck). Einstein obtenait ainsi une dérivation purement quantique de la loi de Planck, avec en prime deux relations entre les coefficients d'émission et d'absorption, et surtout une dérivation générale de la règle de fréquence $\Delta E = h\nu$, que Bohr n'avait cru vraie que pour des mouvements électroniques strictement périodiques.

Ces résultats jouèrent un rôle important dans l'évolution ultérieure de la théorie quantique, et ils continuent aujourd'hui de former la base de notre description des échanges entre atomes et rayonnement. Einstein n'y voyait pourtant qu'un pis-aller, en l'attente d'une théorie plus détaillée et non statistique des sauts quantiques. Pour lui, l'essentiel était plutôt dans leurs implications sur la structure du rayonnement. Dans une seconde partie de son étude, il montra en effet que les fluctuations de vitesse d'un atome interagissant avec du rayonnement noir n'étaient compatibles avec la valeur moyenne $(3/2)kT$ de son énergie cinétique de translation que si le processus d'émission de rayonnement était orienté dans une direction bien définie de l'espace et comportait un échange de quantité de mouvement $h\nu/c$. Cette nouvelle preuve des quanta lumineux était bien plus contraignante que celles antérieurement données par Einstein, car elle ne présupposait guère que la quantification de la matière et la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. De fait, Bohr et Schrödinger ne virent d'autres moyens d'y échapper que d'admettre une violation de la conservation de l'énergie dans les processus quantiques.

L'immense majorité des physiciens continuèrent d'ignorer les quanta lumineux, jusqu'à ce que Maurice de Broglie et Arthur Holly Compton, au début des années vingt, démontrent que l'énergie et la quantité de mouvement étaient bien conservées lors de processus individuels d'interaction entre atomes (ou électrons) et rayons X. D'après les expériences de Compton, lors de l'interaction entre un rayonnement monochromatique et un électron (quasi-libre) la fréquence du rayonnement secondaire dépend de la direction d'émission exactement comme le prévoit l'hypothèse des quanta lumineux. Ce résultat convainquit un nombre croissant de physiciens de la réalité des quanta lumineux, malgré l'absence d'une conciliation plausible avec la théorie ondulatoire.

Cependant, Bohr et ses collaborateurs crurent pouvoir échapper aux quanta lumineux par une étrange théorie de 1924, fondée sur l'idée d'oscillations virtuelles violant la conservation de l'énergie. Au début de 1925, d'insurmontables difficultés les conduisirent à renoncer à cette tentative.

Mais plutôt que d'accepter les quanta lumineux, Bohr décréta un échec général du mode causal et spatio-temporel de représentation dans le domaine atomique. La mécanique quantique naquit peu de temps après, d'abord sous la forme matricielle ou opératoire de Werner Heisenberg, Max Born, Pascual Jordan et Paul Dirac, puis sous la forme ondulatoire élaborée par Erwin Schrödinger à partir d'une idée de Louis de Broglie. Jordan en 1925, puis Dirac en 1927 quantifièrent le rayonnement, donnant ainsi une justification formelle aux quanta lumineux [8, 31].

Il serait naïf de croire que ces développements confirmèrent l'idée que se faisait le jeune Einstein des quanta lumineux. Pour les fondateurs de la nouvelle mécanique quantique, le concept classique de corpuscule devait être à jamais rejeté du domaine quantique. Suivant la « complémentarité » de Bohr (1927), la lumière pouvait certes manifester un comportement corpusculaire, mais seulement dans des contextes expérimentaux physiquement incompatibles avec les dispositifs susceptibles de révéler un comportement ondulatoire. De plus, la position et la quantité de mouvement d'un corpuscule ne pouvaient être simultanément déterminés dans un même dispositif. Il était donc vain de se représenter un électron ou un photon comme un corpuscule de trajectoire bien définie. La plupart des physiciens approuvèrent ce point de vue. Mais Einstein n'y trouva aucune réponse à ses vieilles inquiétudes sur la nature de la lumière. Peu de temps avant sa mort, il confiait à l'ami Besso¹⁷ :

Ces cinquante ans de rumination consciente ne m'ont en rien rapproché d'une réponse à la question : « Que sont les quanta lumineux ? » Aujourd'hui, le premier fripon venu croit savoir ce qu'ils sont, mais il se leurre.

Revenons au début des années vingt, au moment où les quanta lumineux commençaient à être pris au sérieux. Einstein reçut alors d'un certain Satiendra Nath Bose un manuscrit contenant une nouvelle dérivation de la loi de Planck, entièrement corpusculaire mais promptement rejetée par la revue *Nature*. Bose traitait le rayonnement thermique comme un gaz de quanta lumineux à distribuer sur des cellules quantiques de taille h^3 dans l'espace des configurations. Pour compter le nombre de distributions, il se servait d'une vieille formule combinatoire de Boltzmann, mais en intervertissant inconsciemment le rôle des cellules et celui des corpuscules. Cela conduisait à la loi de Planck via la relation de Boltzmann entre entropie et probabilité combinatoire. Einstein, peu inquiet de l'étrangeté du procédé, s'avisait que son caractère purement corpusculaire permettait une transposition au cas d'un gaz de matière. Ce faisant, et tenant compte de la constance du nombre total de molécules, il obtint la théorie dite de Bose-Einstein des gaz quantiques [31, 51, 52].

Cette théorie n'était certes pas la première qui prédit une dégénérescence quantique des gaz parfaits (dont les molécules interagissent peu). De manière générale, le théorème de Nernst (1905) impliquait que l'entropie d'un corps s'annule au zéro absolu de température. Pour les solides, la théorie d'Einstein

¹⁷Einstein à Besso, 12 décembre 1951, dans [47].

des chaleurs spécifiques satisfaisait cette contrainte. Pour des corps susceptibles de rester gazeux à très basse température, Planck pensait que la quantification du mouvement pouvait jouer un rôle similaire, à condition que les états quantiques du système global soient peu nombreux pour les énergies les plus basses. En 1916, il était parvenu à satisfaire à cette condition, et Schrödinger l'avait fait d'une manière différente en 1924. Mais leurs règles de quantification avaient quelque chose d'*ad hoc*, alors qu'Einstein pouvait justifier la sienne au nom de l'analogie entre matière et lumière.

Dans un second mémoire, Einstein décrit la condensation dite « de Bose-Einstein » et il relia le comptage de Bose à l'indiscernabilité des particules distribuées, qui supposait une « mystérieuse influence mutuelle ». Pour avoir une idée de la dynamique sous-jacente, il eut une nouvelle fois recours à un argument de fluctuation. Partant de la distribution d'énergie des molécules du gaz quantique, il obtint l'expression

$$\overline{(n_E - \bar{n}_E)^2} / \bar{n}_E^2 = 1/\bar{n}_E + 1/2\pi V h^{-3} (2m)^{3/2} E^{1/2} dE \quad (1.25)$$

pour les fluctuations quadratiques moyennes du nombre n_E de molécules (de masse m) comprises dans le volume V et dans l'intervalle d'énergie cinétique dE . Cette formule a la même structure que la formule analogue de 1909 pour les fluctuations du rayonnement noir. Comme Einstein venait justement de lire la thèse de Louis de Broglie (que son ami Langevin avait soumise à son jugement), il reconnut dans le second terme du second membre l'inverse du nombre de modes stationnaires d'ondes brogliennes dans une cavité de volume V pour un intervalle d'énergie dE . Frappé par cette coïncidence, il écrivit à Langevin :

Le travail de Louis de Broglie m'a grandement impressionné. Il a soulevé un coin du grand voile. Dans un nouvel article, j'obtiens des résultats qui semblent confirmer les siens. Si vous le voyez, veuillez lui communiquer toute mon estime et ma sympathie.

Le jugement d'Einstein attira l'attention sur le travail de Louis de Broglie, qui eût sinon passé pour une spéculation purement formelle. L'année suivante, Schrödinger établit la mécanique ondulatoire sur cette base¹⁸ [53–55].

Résumons. Bien qu'Einstein n'ait pas directement contribué à la construction de la mécanique quantique, il a fourni plusieurs des éléments de cette construction. Il a d'abord été le premier à reconnaître la nécessité d'une réforme radicale des théories classiques. Il a introduit la discontinuité quantique sous la forme utile à la théorie de Bohr. Il a donné des lois quantitatives – quoique statistiques – de l'interaction entre atomes quantifiés et rayonnement. Son insistance sur une analogie profonde entre matière et lumière a inspiré les ondes de matière de Louis de Broglie. À travers sa théorie quantique des gaz, il a identifié un trait caractéristique de la physique quantique, l'indiscernabilité

¹⁸Einstein à Langevin, 16 décembre 1924, Einstein Archive, Jerusalem.

de particules identiques, et reconnu son lien avec les ondes brogliennes. Enfin, il eut très tôt l'audace d'accorder à la lumière des propriétés corpusculaires et anticipa ainsi la notion de photon.

Et pourtant, Einstein ne se satisfait jamais de la mécanique quantique. Il reconnut certes la justesse et la puissance explicative de cette théorie, mais il ne put jamais l'admettre comme ultime représentation des phénomènes quantiques. Selon lui, le caractère probabiliste de cette théorie impliquait qu'elle fût incomplète. De même qu'il avait réduit les probabilités thermodynamiques à des fréquences temporelles, il espérait attribuer les probabilités quantiques à notre ignorance de la dynamique complète des systèmes quantiques. De 1927 à 1930, il tenta même de violer les relations d'incertitudes de Heisenberg par des expériences de pensée, dont la plus célèbre est le pèse-photon du congrès Solvay de 1930. Après que Bohr eut spectaculairement réfuté cet argument, Einstein admit l'impossibilité de mesurer des grandeurs conjuguées avec une précision qui enfreignît les relations de Heisenberg. Mais il continua de croire en la possibilité de les définir simultanément et exactement dans une théorie plus complète¹⁹.

Le célèbre argument formulé par Einstein, Podolsky et Rosen en 1935 montrait en effet que la mécanique quantique violait le critère de complétude suivant :

Chaque élément de la réalité physique doit avoir un correspondant dans la théorie physique ; [étant entendu que] si sans perturber le système en aucune façon, nous pouvons prédire avec certitude... la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de la réalité physique correspondant.

Il suffit, pour voir la violation, d'imaginer un système de deux particules 1 et 2 ayant chacune les propriétés conjuguées q et p , et prises dans un état propre des observables $q_1 - q_2$ et $p_1 + p_2$. Une mesure de q_1 permettrait de déterminer q_2 sans aucunement perturber la particule 2, à condition que celle-ci soit suffisamment éloignée de la particule 1. De même, une mesure de p_1 permettrait de déterminer p_2 sans perturber la particule 2. Le critère de réalité d'EPR implique donc que q_2 et p_2 aient toutes deux des valeurs définies, bien que la mécanique quantique ne les définisse que dans la limite des relations d'incertitude de Heisenberg [31, 56].

Bohr opposa à Einstein un critère de complétude moins exigeant, selon lequel le degré de définition des grandeurs théoriques devait être exactement conforme aux possibilités de mesure effective de ces grandeurs. Le dispositif EPR ne violait nullement ce critère, car seule une mesure *effective* de q_1 et de p_1 aurait permis d'inférer conjointement les valeurs de q_2 et de p_2 . Or une telle mesure était inconcevable. Autrement dit, Bohr présentait que l'incompatibilité physique de dispositifs de mesure de grandeurs mesurées en un lieu donné, impliquait l'incompatibilité d'inférences sur des propriétés corrélées

¹⁹Bohr, « Discussions with Einstein on epistemological problems in atomic physics », dans [1] pp. 199–242.