

BORIS CHENAUD

1905 L'ANNÉE MIRACULEUSE D'EINSTEIN

Préface de David Louapre

Illustrations :
Stéphane Humbert-Basset



INTRODUCTION

1905 *annus mirabilis*

Année miraculeuse, *annus mirabilis*... Ces termes portent un poids considérable. Dans l'histoire, lorsqu'on évoque un *annus mirabilis*, on se réfère à une année marquée par des événements majeurs ayant provoqué des ruptures profondes ou des changements décisifs pour l'humanité, ou du moins pour une grande partie de celle-ci.

Plusieurs années ont ainsi été qualifiées d'*annus mirabilis*.

L'année 1492 est associée à l'arrivée de Christophe Colomb en Amérique, un événement qui a marqué le début de l'expansion espagnole et qui a eu des répercussions tragiques sur les populations autochtones.

L'année 1789 est synonyme de la Révolution française, une période charnière qui a non seulement transformé la société et la politique en France, mais qui a également influencé une grande partie du monde, annonçant la fin des monarchies absolues et le début de réformes démocratiques.

Quant à l'année 1969, elle reste mémorable pour l'atterrissage des premiers humains sur la Lune, un exploit qui a marqué une avancée sans précédent dans l'exploration spatiale.

Alors, pourquoi qualifier l'année 1905 d'année « miraculeuse » ? Quels aspects des travaux d'Einstein cette année-là justifient cette appellation ? Au fond, parmi tous les exemples historiques, c'est peut-être l'année 1905 qui illustre le mieux l'expression *annus mirabilis*. En effet, quoi de plus extraordinaire, de plus « mirabilis », que la publication, par un tout jeune physicien de 26 ans, de quatre articles qui allaient profondément transformer la Physique. Quatre articles qui ont ouvert des domaines fondamentaux de la physique moderne, qui ont tranché des débats scientifiques vieux de plusieurs siècles et qui ont radicalement changé notre vision

du monde et de l'univers. Quatre articles qui nous ont fait découvrir de nouveaux horizons : la preuve irréfutable de l'existence des atomes, le premier pas exploratoire dans le monde quantique, la refonte complète de la mécanique et de notre compréhension des concepts d'espace et de temps, l'équivalence « masse-énergie »... Une telle richesse pourrait nous amener, par paresse intellectuelle, à considérer l'expression *annus mirabilis* au sens littéral, comme l'année de quatre miracles, fruits d'une inspiration presque surnaturelle mais, comme nous le verrons, il n'en est rien. Les quatre contributions majeures d'Albert Einstein sont bien les fruits du génie d'un humain, d'un jeune inventif et sans tabou, d'un bourreau de travail très au fait de la production scientifique de son époque et des débats qui secouent grandement la physique en ce début de siècle. Évidemment, il est aussi l'héritier des géants qui l'ont précédé et sur les épaules desquels il se hisse.

La fraîcheur, l'imagination, la fécondité de cette année 1905, l'impact prodigieux de ces quatre articles d'Albert Einstein, l'importance des nouveaux champs qu'ils ont ouverts et que l'on retrouve encore aujourd'hui dans nos fondations de la physique, justifient pleinement que l'on s'y plonge tout au long de ces quelques pages.

Où en est la physique avant 1905 ?

À la fin du XIX^e siècle, le climat scientifique était empreint d'un sentiment d'achèvement dans le domaine de la physique. Les plus grands physiciens de l'époque croyaient avoir résolu les mystères les plus profonds de leur discipline. Les idées fondamentales étaient posées et il semblait que seuls restaient à perfectionner les outils de mesure et la précision des calculs pour explorer la nature dans ses moindres détails. Cependant, cette vision idyllique de la physique était sur le point d'être profondément bouleversée par des découvertes ouvrant la voie à plusieurs révolutions scientifiques et faisant émerger la physique moderne.

Une célèbre illustration de cette vision idyllique est l'évocation des « fameux nuages » que l'on attribue à Lord Kelvin, un des géants de la physique de l'époque, dont l'aura cependant diminue quelque peu en ce début de XX^e siècle. En effet, la légende raconte que lors d'une séance à la Royal Institution de Londres en 1900, Lord Kelvin aurait déclaré ceci :

*« Certes, il reste bien quelques petits nuages
qui flottent dans le grand ciel bleu de la physique :
le problème de l'éther et celui du rayonnement
du corps noir, mais à n'en pas douter,
ils seront rapidement dispersés à l'orée de ce nouveau
siècle, et alors le travail du physicien ne consistera
qu'à faire des mesures et des prédictions de plus
en plus précises.¹ »*

Or, ces « quelques petits nuages » cachaient en réalité des problèmes profonds. Ils mettaient à l'épreuve les théories physiques alors établies au point de les remettre totalement en question et de bouleverser radicalement de nombreux concepts fondamentaux de la physique. Parmi ces nuages, prenons deux exemples emblématiques que nous explorerons en détail dans les parties II et III de cet ouvrage : le « rayonnement du corps noir » et le « vent d'éther ».

Le rayonnement du corps noir était un grand mystère pour les physiciens à la fin du XIX^e siècle. Un corps noir est un objet idéal qui émet de la lumière dont la couleur et l'intensité dépendent uniquement de sa température : plus il est chaud, plus son rayonnement est intense et plus sa couleur tend vers des nuances de bleu, de violet. Ce rayonnement peut être décomposé en un spectre, une palette révélant les différentes couleurs, ou fréquences lumineuses², qui le composent. Ce spectre permet aussi de mesurer l'intensité de chaque couleur, c'est-à-dire

1. En fait, la citation exacte de Lord Kelvin, trop souvent déformée, est : « La beauté et la clarté de la théorie dynamique, qui présente la chaleur et la lumière comme des modes de mouvement, sont actuellement obscurcies par deux nuages. » W. Thomson (Lord Kelvin), « Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light », *Philosophical Magazine*, vol. 2, pp. 1-40, 1901. Contrairement à la version légendaire, Kelvin n'évoque pas une « fin de la physique » et ne qualifie pas les nuages de « petits ». De plus, il ne mentionne pas spécifiquement le rayonnement du corps noir, mais ces deux « nuages » auxquels il fait référence concernent le théorème d'équipartition de l'énergie de Ludwig Boltzmann, sur lequel nous reviendrons, et l'existence de l'éther, des sujets qui seront également centraux dans l'émergence de la mécanique quantique et de la relativité. Mais si l'on prête ces propos à Lord Kelvin, c'est parce qu'il est, symboliquement, le représentant de la « vieille physique », de la « physique pré-moderne » qui baignait dans l'éther, si l'on peut dire, celle qui n'a pas vu venir ni la révolution relativiste, ni la révolution quantique. En fait, cette légende vise à scénariser le conflit des établis et des modernes qui a secoué la physique en ce début du XX^e siècle.
2. Plus la fréquence est importante (haute), plus la « couleur » de ce rayonnement se rapproche du violet, et au-delà, ce sont les « couleurs » ultraviolettes.

l'énergie associée : par exemple, une forte présence de rouge et peu de bleu, ou inversement. À l'époque, les théories classiques, comme l'électromagnétisme de l'écossais James Clerk Maxwell, prédisaient que, lorsque l'on mesure l'énergie de la lumière des différentes couleurs qui composent le rayonnement émis par ce corps noir. L'énergie de cette couleur augmente quand la fréquence de cette lumière augmente.

Ces théories prédisaient même que cette énergie devait être *infinie* dans les ultraviolets ! Mais cette idée, appelée la « catastrophe ultraviolette », ne collait évidemment pas du tout avec ce qu'on observait dans les expériences. D'ailleurs, il a fallu une nouvelle théorie, une nouvelle physique même, celle de la physique quantique, pour résoudre ce problème et expliquer comment les objets émettent réellement de la lumière, en fonction de leur température. Comme quoi ce « petit nuage » était en fait bien dense...

Quant à l'éther et au « vent d'éther », les scientifiques de l'époque pensaient qu'il existait une sorte de substance invisible dans l'espace qui permettait aux ondes lumineuses et aux ondes électromagnétiques en général, de voyager. Selon cette théorie, lorsqu'un objet se déplaçait dans cet éther, cela induisait un vent relatif d'éther. Mais cette idée posait plusieurs problèmes, notamment lorsque l'on mesurait la vitesse de la lumière : les résultats de ces mesures ne changeaient pas, que l'on soit face à ce « vent d'éther » ou non. L'accumulation d'expériences contredisant cette théorie de l'éther a poussé les physiciens à abandonner l'idée même de l'éther et à chercher d'autres façons d'expliquer la propagation de la lumière, ce qui a conduit à des découvertes importantes, comme la théorie de la relativité d'Albert Einstein.

Parallèlement aux « petits nuages » de Lord Kelvin, d'autres questions restaient en suspens comme celle de l'hypothèse atomique qui suscitait également d'importants débats animés. Les physiciens qui soutenaient cette hypothèse, tels John Dalton et Dmitri Mendeleïev, voyaient dans cette théorie une explication élégante et cohérente des lois chimiques et des propriétés des éléments. John Dalton, par exemple, avait fait l'hypothèse que les éléments chimiques étaient constitués d'atomes de tailles et de masses spécifiques. Dimitri Mendeleïev, avec son tableau périodique, avait également renforcé cette vision en regroupant les éléments en fonction de leurs propriétés chimiques.

Cette « théorie atomique », qui postule que la matière est constituée de particules indivisibles appelées atomes, n'était pas encore universellement acceptée à la fin du XIX^e siècle. Elle avait ses détracteurs,

et pas des moindres. En effet, des scientifiques comme Ernst Mach et Wilhelm Ostwald, deux géants de la physique de cette époque, remettaient en question l'existence des atomes. Ernst Mach, en particulier, était très critique à l'égard de la notion d'atomes en raison de la difficulté à les observer directement et de l'absence de preuves expérimentales convaincantes pour étayer leur existence. Wilhelm Ostwald, de son côté, trouvait que la théorie atomique était une construction théorique inutile pour expliquer les phénomènes physiques et préférait des explications basées sur des principes directement observables et mesurables.

Malgré ces controverses, les preuves expérimentales commençaient à s'accumuler, notamment grâce aux travaux sur le mouvement brownien et aux expériences sur la diffusion de la lumière. Ces observations suggéraient de plus en plus fortement l'existence d'entités discrètes responsables des comportements observés dans la matière. Mais la théorie était loin d'être complète et les mécanismes sous-jacents au comportement des atomes restaient partiellement incompris. Les physiciens atomico-sceptiques s'engouffraient d'ailleurs dans les lacunes de cette théorie alors balbutiante et les tensions restaient vives autour de ce sujet dans la communauté de la physique.

Ainsi à la fin du ^{xix}^e siècle, bien que la physique semble reposer sur des bases solides et stables, les problèmes non résolus et les questions émergentes annonçaient en réalité une transformation radicale de cette science. En 1900, Max Planck amorce les choses en introduisant les quanta d'énergie pour expliquer le rayonnement du corps noir et, au cours de l'année 1905, le jeune physicien Albert Einstein fait entrer la physique dans une ère de découvertes qui allaient profondément redéfinir notre compréhension de l'univers. En l'espace de quelques années, ces « petits nuages » se muèrent en une tempête scientifique sans précédent, donnant naissance aux fondements de la physique moderne.

1905 : le jeune Albert Einstein au seuil de l'Histoire

Au début de l'année 1905, Albert Einstein, alors âgé de 26 ans, travaille comme employé à l'Office des brevets de Berne, en Suisse, pour subvenir aux besoins de sa jeune famille. En effet, il est marié à Mileva Marić,

une mathématicienne serbe, et déjà père d'un fils, Hans Albert. À côté de son travail routinier, il consacre son temps libre à la recherche en physique, une passion qui le dévore¹.

Employé comme « technicien de troisième classe » à « l'Office fédéral de la propriété intellectuelle » de Berne, Albert Einstein examine les demandes de brevets pour diverses inventions. Il évalue leur faisabilité technique et leur originalité. Ce travail, bien que parfois répétitif, confronte Albert Einstein à une diversité de problèmes techniques qui nourrissent indirectement ses réflexions sur la physique. Travaillant dans un environnement dans lequel l'innovation est centrale, il développe une approche méthodique pour résoudre des problèmes complexes, stimulant ainsi sa créativité. De plus, ce poste lui laisse suffisamment de temps libre pour se consacrer à ses recherches personnelles, ce qui lui permet de développer ses théories révolutionnaires.

Malgré son éloignement des grands centres académiques, Albert Einstein parvient à maintenir des échanges constants avec d'autres scientifiques. Parmi ses correspondants les plus importants figure son ami suisse Michele Besso, un ingénieur brillant et curieux. À ses côtés, Albert Einstein trouve un interlocuteur privilégié, avec qui il discute librement de physique, notamment de thermodynamique et de théorie du rayonnement. Sur sa recommandation, Michele Besso rejoindra Albert Einstein à « l'Office des brevets » de Berne en 1904. Leurs discussions jouent un rôle crucial dans l'élaboration des futures théories d'Albert Einstein, Michele Besso l'aidant particulièrement à affiner ses idées sur le concept du temps, un aspect fondamental de la relativité restreinte².

Albert Einstein est également entouré d'autres *sparring-partners* intellectuels tels que Conrad Habicht, mathématicien suisse, et Maurice Solovine, étudiant en mathématiques et en philosophie d'origine roumaine. Toute cette petite bande forme un petit cercle d'amis surnommé « l'Académie Olympia ». Ce groupe se réunit régulièrement à Berne pour discuter de philosophie, de littérature et surtout de physique. Ensemble, ils explorent des sujets tels que la mécanique classique, la thermodynamique et l'électrodynamique. Ces échanges, parfois tenus lors de longues balades en montagne, permettent à Albert Einstein de

1. A. Pais, *Albert Einstein : La vie et l'œuvre*, Interéditions, 1993.

2. C. Bracco, *Quand Albert devient Einstein*. CNRS Éditions, 2017.

partager et de développer ses premières idées qui le mèneront à repenser entièrement la mécanique et la physique classique.

Ainsi, si Albert Einstein est loin des universités et des laboratoires, il est également loin des contraintes administratives et pédagogiques inhérentes à ces postes académiques, ce qui lui libère un temps précieux.

Une autre figure clé dans les premiers travaux scientifiques d'Albert Einstein est son épouse, Mileva Marić¹. Étudiante en physique et mathématiques, Marić est l'une des rares femmes de son époque à atteindre un niveau d'études aussi avancé dans ces domaines. Albert et Mileva se sont rencontrés à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zurich), où ils ont fait leurs études et commencé à échanger leurs idées sur la physique. Après leur mariage en 1903, comme toutes les femmes de son époque, Mileva Marić a pris en charge les responsabilités domestiques, permettant à Albert Einstein de se concentrer sur ses recherches. Ce soutien logistique, bien qu'indirect, facilite le travail d'Albert Einstein et contribue ainsi de manière significative à ses réalisations scientifiques de 1905. Mais la contribution de son épouse va sûrement bien plus loin. Il est en effet fort probable que Mileva Marić ait eu une influence intellectuelle sur Albert Einstein, surtout dans les premières années de leur relation. Dans une lettre de 1901, très souvent citée, qu'Albert Einstein adresse à Mileva Marić, il fait référence explicitement à un travail commun avec elle. On peut en effet y lire l'expression « notre travail » dans un passage concernant le « mouvement relatif ». Toutefois, ce « notre » pourrait simplement refléter leur relation étroite plutôt qu'une collaboration scientifique formelle. Bien que le rôle exact de Mileva Marić dans les travaux de 1905 d'Albert Einstein reste à établir, Mileva Marić fut sans conteste une partenaire intellectuelle très importante pour lui.

Tout ceci pour dire qu'en 1905, le jeune physicien Albert Einstein est alors prêt à entrer pleinement dans l'histoire de la physique et dans l'Histoire elle-même.

1. M. Bénédicte, *Madame Einstein*, Édition 10-18, 2019.

1905 : un tournant majeur dans l'histoire de la physique¹

Le 30 avril 1905, Albert Einstein soutient sa thèse de doctorat intitulée *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (Une nouvelle détermination des dimensions moléculaires) à l'Université de Zurich. Dans sa thèse, il propose une méthode pour déterminer la taille des molécules en se basant sur des observations expérimentales de la diffusion de la lumière dans les liquides, amenant ainsi de l'eau au moulin de la théorie atomique.

Cette même année, Albert Einstein, véritable bourreau de travail, publie plus d'une vingtaine d'articles de synthèse sur les travaux de physiciens renommés comme Paul Langevin, Max Planck et Jacobus Henricus Van't Hoff. Tous ces travaux, touchant principalement à la théorie cinétique des gaz, à la thermodynamique, à la chaleur, et même aux effets gravitationnels², témoignent de son engagement dans les débats scientifiques de son époque et de son désir de contribuer activement à l'avancement de la physique théorique et appliquée. La somme de travail qu'il abat est impressionnante, d'autant plus impressionnante que cette même année Albert Einstein ne s'est pas contenté seulement de commenter les travaux d'autres physiciens, il est allé bien plus loin.

Une quadruple révolution en marche³

En effet, en 1905, Albert Einstein publie surtout ses quatre articles révolutionnaires. Il les publie dans la revue *Annalen der Physik*, l'une des plus anciennes et des plus prestigieuses revues de physique. Chacun de ces articles aborde un domaine différent de la physique et aura un impact profond sur notre compréhension du monde, ouvrant à chaque fois un champ nouveau et fécond de ce qui deviendra la « Physique Moderne ».

1. J. Stachel & al., *Einstein's Miraculous Year : Five Papers That Changed The Face Of Physics*, Princeton University Press, Revised édition (17 avril 2005).
2. Liste des publications scientifiques d'Einstein année par année : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_scientific_publications_by_Albert_Einstein.
3. O. Darrigol, « 1905 : un nouvel élan », *Einstein aujourd'hui*, CNRS Éditions, EDP Sciences, 2005.

Le **17 mars 1905**, il publie *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, que l'on peut traduire par « *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* ». Dans cet article sur l'effet photo-électrique, il jette les bases de la mécanique quantique, ce qui lui vaudra d'ailleurs le prix Nobel de Physique en 1921.

Le **11 mai 1905** paraît l'article *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, soit en français « *Sur le mouvement de petites particules en suspension dans un liquide au repos, requis par la théorie cinétique moléculaire de la chaleur* ». Cette fois-ci, le jeune Albert applique des concepts statistiques pour expliquer le mouvement brownien, c'est-à-dire le mouvement erratique des particules dans un fluide, proposant ainsi une expérience pour prouver l'existence des atomes et des molécules, question qui était encore débattue à l'époque.

Le **30 juin 1905** paraît *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, soit « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* ». Cet article est sûrement le plus connu des quatre. Il s'agit de l'article fondateur de la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein, théorie sur laquelle est bâti l'édifice de la physique moderne.

Enfin, le **27 septembre 1905**, Albert Einstein conclut cette année des plus fécondes par son article *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?*, que l'on peut traduire par « *L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu énergétique ?* ». C'est de cet article que surgira l'une des formules les plus célèbres de la Physique $E = mc^2$.

Dans ce livre, nous nous proposons de parcourir ces quatre articles fondateurs d'Albert Einstein parus en 1905, année miraculeuse pour lui, pour les sciences, mais sûrement aussi pour l'Humanité. Ces quatre articles sont les jalons de notre livre. En effet, chacune des quatre parties est consacrée à l'un de ces articles, sans pour autant suivre la chronologie de leur parution.

- I. La première partie se penche sur l'article d'Albert Einstein qui confirme l'existence des atomes en expliquant le mouvement brownien.
- II. La seconde partie se consacre à celui qui pose les bases de la physique quantique en expliquant l'effet photoélectrique.

III. La troisième partie traite de l'article qui introduit la fameuse relativité restreinte, ne révolutionnant rien de moins que les concepts d'*espace* et de *temps*.

IV. La quatrième et dernière partie s'intéresse à l'article qui donna naissance à la célèbre et terrible équation $E = mc^2$, reliant masse et énergie.

Pour chaque article, nous explorons ainsi l'état des connaissances sur le sujet traité avant 1905, l'impact décisif de ce travail, et enfin les nouvelles perspectives passionnantes et inédites qu'Albert Einstein apportera dans ce domaine de la physique. Nous mettons également ponctuellement en lumière des aspects de la vie d'Albert Einstein en lien avec ses découvertes et leurs répercussions. Cependant, notre principal objectif ici est de présenter l'émergence de ses idées révolutionnaires et la naissance des principaux concepts qui ont propulsé pleinement la physique dans le xx^e siècle.

En 1905, grâce aux articles d'Albert Einstein, le monde a fait un bond prodigieux vers la modernité, pleine de promesses, mais aussi de nouveaux dangers.

Chapitre I

LE MOUVEMENT BROWNIEN



ANNALEN DER PHYSIK.



*Über die von der molekularkinetischen Theorie der
Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden
Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;**
von ALBERT EINSTEIN.

* Sur le mouvement requis par la théorie cinétique
moléculaire de la chaleur des particules en suspension
dans des liquides au repos.

ANNALEN DER PHYSIK — Vol. XVII, №8, 549-560 — 11 MAI 1905.



1. La danse du pollen

Les fleurs de la *Clarkia pulchella* arborent une teinte lavande. Elles sont composées de quatre lobes, chacun étant trilobé, avec le lobe central plus large que les autres. Ces lobes se rejoignent et fusionnent à leur base. De cette fusion part le pistil, entouré d'étamines. En suivant une étamine, on arrive à l'anthère, la partie qui produit et stocke les grains de pollen.

En juin 1827, c'est précisément sur des grains de pollen de la *Clarkia pulchella*, en suspension dans une goutte d'eau sur la lame de son microscope, que se concentre l'attention du botaniste écossais, Robert Brown, bibliothécaire et conservateur des collections botaniques au British Museum de Londres. Cet été-là, il entreprend une étude sur la structure des grains de pollen de diverses plantes et sur le rôle du pollen dans la reproduction végétale¹.

Les grains de pollen sont enfermés dans une bulle d'eau, formée par mouillage, à la surface du verre. Cette technique classique permet d'observer de très petits objets, comme ces grains, longs de 6 à 8 μm ². Mais ce que Robert Brown observe à travers son microscope est bien moins classique, et même tellement inhabituel qu'il rédige, à partir de ses observations, un article intitulé *A Brief Account of Microscopical Observations made in the Months of June, July, and August, 1827, on the Particles Contained in the Pollen of Plants*, publié en janvier 1828 dans l'une des plus anciennes revues scientifiques du monde, le *Philosophical Magazine*. Voici ce qu'il dit à propos des grains de pollen :

« J'ai observé que beaucoup d'entre eux étaient très visiblement en mouvement. Ces mouvements étaient tels qu'ils indiquaient une puissance de mouvement inhérente, indépendante de toute cause externe. »

Les grains de pollen microscopiques virevoltent sous ses yeux, participant à une danse aux mouvements aléatoires. À cette époque, l'idée que des particules microscopiques puissent être en mouvement sans cause apparente était nouvelle et inattendue. Robert Brown n'était pas

1. B. Duplantier, « Le mouvement brownien », *Séminaire Poincaré : Einstein, 1905-2005* (Paris, 8 avril 2005).
2. Un micromètre, noté 1 μm , est une longueur correspondant à un millionième de mètre, c'est-à-dire un millième de millimètre. C'est l'unité typique du monde à l'échelle *micro-scopique*.

a priori dans la même situation que l'opticien et scientifique néerlandais Antonie van Leeuwenhoek au XVII^e siècle, lorsqu'il observa le mouvement des spermatozoïdes dans le sperme, un mouvement clairement lié à une activité biologique et à des cellules vivantes. Il fallait cependant s'en assurer.

Robert Brown renouvelle alors l'expérience avec d'autres types de pollen, et le résultat reste identique. Ces grains de pollen, qui bougent de façon erratique, lui semblent vivants ! Existe-t-il en leur sein des micro-organismes encore plus petits, invisibles même au microscope, et responsables de ces mouvements ? Pour le savoir, Robert Brown décide de tester l'effet de divers produits chimiques qui auraient normalement pour effet de tuer tout organisme vivant, tels que l'alcool et d'autres conservateurs. Sous ses yeux, la danse continue. Les grains de pollen présentent toujours le même mouvement aléatoire, même après ces traitements. Ces expériences lui montrent que ce mouvement très particulier n'est donc probablement pas dû à des micro-organismes.

Pour s'en assurer définitivement, il place cette fois-ci sous son microscope non pas des pollens ou d'autres particules issues du monde vivant, mais des substances inertes : des particules de charbon, des poussières de roche, des fragments de verre... À chaque fois, il constate la même chose : ces particules ont le même type de mouvement irrégulier que les grains de pollen. Ces particules mises en suspension dans une goutte d'eau suivent la même danse folle et perpétuelle. Ce mouvement se distingue d'autres phénomènes physiques par son caractère aléatoire et incessant. Contrairement aux mouvements causés par des forces externes, comme le vent qui agite les feuilles ou les courants qui déplacent les objets dans l'eau, il ne cesse jamais et ne suit aucune direction particulière.

Robert Brown modifie ensuite les conditions physiques autour de sa lame de microscope – température, éclairage... – mais aucun de ces changements n'a d'impact significatif sur ce mouvement. Ces observations convainquent Robert Brown que le phénomène est d'origine physique, mais l'explication complète devra attendre le début du XX^e siècle. Ce phénomène observé et décrit par Robert Brown en 1827 émerveille encore de nos jours où il demeure connu sous le nom de « mouvement brownien ».

Nous savons aujourd'hui que ce mouvement est dû à l'agitation thermique des molécules environnantes, qui heurtent sans cesse les particules en suspension. Mais ce « mouvement apparemment perpétuel »

a longtemps défié l'intuition scientifique et, pour les contemporains de Robert Brown, le mystère restait entier, aucune explication claire ne permettait de l'expliquer.

Il faudra attendre près de 80 ans et le fameux article de 1905 d'Albert Einstein sur le mouvement brownien pour avoir enfin une explication solide à l'agitation erratique des particules en suspension dans un liquide. Albert Einstein y souligne d'ailleurs l'importance du travail de Robert Brown :

« Le mouvement brownien est l'une des premières preuves directes de l'existence des atomes, et il nous offre une fenêtre unique sur l'agitation thermique des molécules. »

Ainsi son article transformera une simple observation d'un phénomène en l'un des piliers fondamentaux de la physique moderne : la preuve de l'existence des atomes. Mais n'allons pas trop vite.

2. La bataille de l'atome

« Je crois que la meilleure connaissance scientifique que l'on puisse transmettre en une phrase, dans l'hypothèse où toute la connaissance scientifique serait détruite et qu'une seule phrase devait être préservée pour les générations futures est : toutes les choses sont faites d'atomes, de petites particules qui se déplacent sans cesse, attirées les unes par les autres lorsqu'elles sont un peu éloignées, mais se repoussant lorsqu'on tente de les comprimer les unes contre les autres. »

Cette citation célèbre du physicien américain Richard Feynman est extraite de son ouvrage emblématique *Leçons de physique* de 1964, une référence incontournable encore aujourd'hui pour les physiciennes et physiciens.

Richard Feynman souligne ainsi que la connaissance de l'existence des atomes est fondamentale, tant pour les sciences de la matière que pour celles du vivant. Cette simple idée englobe de nombreuses notions clés en physique, en chimie, en biologie, et dans bien d'autres domaines. Pourtant, l'hypothèse atomique n'a été largement acceptée que relativement

récemment, parallèlement aux avancées dans notre compréhension de l'énergie et de la chaleur. Il a fallu attendre les travaux expérimentaux de Jean Perrin, réalisés entre 1908 et 1909, qui s'appuyaient notamment sur les idées publiées par Albert Einstein dans son article de 1905 consacré au mouvement brownien, pour que l'existence des atomes soit définitivement prouvée et enfin admise par l'ensemble de la communauté scientifique.

Au XIX^e siècle, la compréhension de la matière et de l'énergie était encore loin d'être établie. Ainsi la théorie atomique, proposée dès l'Antiquité par Démocrite, restait une hypothèse parmi d'autres. Pour de nombreux scientifiques, la matière était perçue comme continue et homogène, sans structure atomique. Ce siècle fut d'ailleurs marqué par ce débat acharné sur la nature ultime de la matière, un débat d'où allait émerger notre compréhension moderne de l'univers¹.

Le débat sur l'existence des atomes

Dans le camp des sceptiques, Ernst Mach, physicien, philosophe autrichien et surtout figure centrale de « l'école de Vienne », un cercle d'intellectuels qui influença profondément la philosophie des sciences au tournant du XX^e siècle, rejetait l'idée des atomes, qu'il considérait comme des entités hypothétiques et inutiles. Ernst Mach plaidait pour un empirisme radical. Selon lui et ses partisans, la science devait se limiter strictement à ce qui pouvait être observé et mesuré directement. Les atomes, invisibles et purement théoriques à cette époque, ne répondaient pas à ces critères de vérifiabilité empirique. Pour Ernst Mach, l'idée d'entités non observables, comme les atomes, introduisait des éléments métaphysiques inutiles et nuisibles à la clarté scientifique. Cette position influença durablement la pensée scientifique, notamment à travers l'empirisme logique faisant de la vérification empirique des théories le critère principal de leur validité. Cette vision de la matière comme continue, sans éléments indivisibles sous-jacents, s'opposait fermement à celle des atomistes.

Du côté des atomistes, des figures comme John Dalton et Ludwig Boltzmann défendaient avec vigueur l'idée que la matière était constituée de particules indivisibles en mouvement constant. John Dalton, au début du XIX^e siècle, fit l'hypothèse que chaque élément chimique est constitué d'atomes d'une certaine masse, ce qui expliquait les lois de

1. A. Grosman et H. Krivine, *De l'atome imaginé à l'atome découvert*, De Boeck Supérieur, 2015.