

*Pour la Science* (Edition française de *Scientific American*), décembre 2004 : *L'Ère Einstein*, 26-33.

## *[Einstein] 1905, l'année admirable*

Michel Paty

*À 26 ans, Einstein publie quatre articles qui apportent des solutions à des problèmes de physique parfois centenaires et ouvrent la voie à une nouvelle physique, encore féconde 100 ans plus tard.*

En l'année 1905, un jeune chercheur passionné de physique, à la vocation un temps contrariée, s'intéresse à trois problèmes théoriques d'actualité, en relation avec des phénomènes observés expérimentalement. À chacun d'eux, il donne une solution sous une forme originale qui restera. Tous les trois ouvrent des perspectives nouvelles, à longue portée, pour la connaissance en physique. Le premier de ces problèmes concerne la constitution atomique ou moléculaire de la matière, et révèle l'existence effective des atomes – restés jusque-là une hypothèse – ouvrant les portes de la physique atomique. Le deuxième porte sur les propriétés du rayonnement électromagnétique, dont il montre que l'énergie se présente sous forme de paquets granulaires (autrement dit, qu'il est constitué de grains d'énergie discontinus, ou « quanta d'énergie »), donnant ainsi l'un des premiers aperçus fondateurs de la physique quantique. Le troisième propose une reformulation du problème de l'« électrodynamique des corps en mouvement », posé depuis la théorie électromagnétique de Maxwell, et constitue ce qui a été appelé par la suite la « théorie de la relativité restreinte ».

### DE NEWTON À EINSTEIN

Ces trois problèmes, formulés et résolus par le jeune Albert Einstein d'une façon originale, figuraient parmi les plus importants de la physique de cette époque, et faisaient l'objet des recherches des meilleurs physiciens du temps. Le « tour » particulier qu'il leur donna et la fécondité qui en résulta pour la résolution d'autres phénomènes marquèrent de façon irréversible la physique tout entière.

Si les grands physiciens n'ont pas manqué au long du xxe siècle, l'avis unanime est qu'Einstein fut le premier d'entre eux. Cette appréciation ne tient pas seulement à l'immense popularité dont il fut l'objet, pour des raisons complexes auxquelles le contexte culturel, social et politique mondial fut loin d'être étranger. Sa renommée tient évidemment à des raisons scientifiques – que nous examinerons ici –, qui ont fait de lui, à 230 ans de distance, l'égal d'un Newton. Newton, dont les premiers travaux dans différents domaines, en mathématiques, en optique et en mécanique, annonçaient déjà, en la seule année 1665-1666, l'ensemble de son œuvre. Toutefois, sa théorie de la gravitation ne connut sa formulation définitive que plusieurs années plus tard, lors de la publication des *Principes mathématiques de la*

*philosophie naturelle*, les *Principia*, dont la première édition en latin parut en 1687. Newton lui-même dénomma cette année de sa jeunesse, préparatoire et si féconde, son *annus mirabilis*, l'année merveilleuse ou admirable...

Cette expression s'applique assez bien aussi à l'année 1905 d'Einstein. Une grande partie de son œuvre propre, mais aussi de la physique du *xxe* siècle, est en germe dans ces premiers travaux. Après avoir exposé le contenu de ses recherches et de ses résultats, nous reviendrons sur la diversité de ses approches des problèmes étudiés, ce qui nous éclairera sur ce que l'on peut appeler son « style » et sur son rapport à l'« objet » de son investigation. Année admirable, donc, que cette année 1905 : ce n'est pas Einstein qui nous l'a dit, mais l'histoire qui le suggère.

Toutefois les analogies ont leurs limites, et le parallèle entre les deux savants et leurs années admirables respectives ne saurait être poussé trop loin ; d'ailleurs, ces années ne font qu'annoncer des éléments d'une œuvre dont on ne pouvait encore préjuger. Le problème d'une théorie de la gravitation constitue le domaine pour lequel la comparaison de leurs apports respectifs s'impose. Pourtant, la justification de la forme de l'attraction newtonienne ne fut acquise par son auteur que peu de temps avant la publication des *Principia* et, dans cette élaboration, sa doctrine de l'espace et du temps absolus et mathématiques n'intervint que tardivement. Au contraire, si dès son travail de 1905 sur la relativité restreinte Einstein redéfinit l'espace et le temps comme des grandeurs physiques intrinsèquement liées et relatives à l'état de mouvement (uniforme) considéré, il n'aborderait que deux ans plus tard le problème de la gravitation ; et ce n'est que progressivement qu'il se rendrait compte de la nécessité de pousser plus avant la réforme de l'espace et du temps pour les rendre plus physiques encore, en les liant à l'état de la matière, à la masse et à l'énergie qui sont les sources du champ de gravitation. Il n'obtiendrait la pleine formulation de sa théorie de la relativité générale qu'à la fin de l'année 1915.

Dès que l'on entre dans les détails, on ne peut que distordre les éléments du parallèle, et la raison en est bien simple : l'histoire des sciences ne se répète pas, les mathématiques et la physique des deux époques sont très différentes, et leurs rapports aussi. Sans compter que les conceptions générales sur la nature et sur la pensée ont évolué. Il est néanmoins intéressant de voir que ces deux œuvres s'inscrivent dans une continuité, malgré les changements considérables survenus dans les sciences. La relativité générale d'Einstein poursuit une conceptualisation et une formulation mathématique plus puissante et globalisante de la physique, dans une direction dont la mécanique et le système du monde newtoniens ont constitué l'un des premiers jalons.

## EXPERT EN BREVETS

À sa sortie de l'Institut polytechnique de Zurich, Einstein ne réussit pas à trouver un poste universitaire pour se livrer, comme il l'aurait souhaité, à la recherche en physique. Il dut se contenter d'un emploi d'ingénieur expert au Bureau des brevets de Berne. Cette fonction exigeait une bonne connaissance de la physique classique, le sens de l'expérience et celui des applications pratiques des théories physiques, toutes qualités que possédait Einstein, qui avait passé beaucoup de temps au laboratoire durant ses études. Il disposait en outre d'un avantage : il connaissait très

bien l'électromagnétisme, tant du point de vue des phénomènes que de la théorie, qu'il avait apprise par lui-même dans des manuels d'ingénieurs.

À l'époque, la théorie de Maxwell n'était pas encore enseignée dans les universités ni dans les écoles d'ingénieurs, et c'était le cas de l'Institut polytechnique de Zurich. La formation autodidacte du jeune Einstein dans ce domaine fut certainement l'une des raisons de son recrutement à l'Office des brevets, car les projets d'appareils électriques et électromagnétiques étaient de plus en plus nombreux. Quant à lui, si son intérêt pour ces questions était réel (il devait proposer lui-même, plus tard, des projets de machines), il se passionnait pour les aspects théoriques, qui devaient donner l'explication des phénomènes et leurs raisons profondes. Des manuscrits de l'époque révèlent qu'il s'interrogeait notamment sur la nature de la lumière et sur le phénomène de l'induction électromagnétique (influence réciproque d'un aimant et d'un circuit électrique fermé en mouvement l'un par rapport à l'autre, faisant naître un courant électrique dans le circuit). D'autres problèmes de physique théorique le préoccupaient et, il se mit à les étudier pour son propre compte, en marge de son travail-gagne-pain, bien qu'éloigné des universités, de leurs laboratoires et de leurs bibliothèques. Outre l'intérêt qu'il portait à ses recherches, il avait l'espoir de réussir un jour à obtenir, grâce à elles, un poste d'assistant en université, comme en témoigne sa correspondance avec ses amis, et notamment avec Mileva Maric, sa première épouse.

## LA THERMODYNAMIQUE REVISITÉE

Les premières recherches publiées d'Einstein (dans les *Annalen der Physik*, l'une des meilleures revues scientifiques de l'époque), à partir de 1901, portaient sur la capillarité, sur les propriétés électriques des sels en solution, sur la thermodynamique et sur la théorie cinétique moléculaire. Malgré leur diversité apparente, ses travaux visaient à expliquer les propriétés physiques (macroscopiques) des corps, par l'hypothèse moléculaire, et préparaient le travail de 1905 sur la théorie de la diffusion et de la dimension moléculaires. La thermodynamique (étude du comportement des systèmes physiques macroscopiques en fonction de la température et d'autres variables) en est la théorie de référence. Nous verrons aussi qu'elle eut un rôle déterminant dans le travail d'Einstein consacré à la quantification de l'énergie.

Inspiré par les travaux de Ludwig Boltzmann sur la théorie cinétique des gaz (dont les *Leçons sur la théorie des gaz*, publiées en 1896-1898, l'avaient enthousiasmé), Einstein s'intéressa, de 1902 à 1904, aux fondements moléculaires de la théorie de la chaleur, c'est-à-dire au rapport de la thermodynamique et de la théorie cinétique.

Boltzmann avait établi une relation pour décrire l'état d'un gaz (exprimé par une fonction, l'entropie,  $S$ ), sans connaître les états de chacune des molécules qui le constituent (donnés par leurs positions et leurs vitesses). L'équilibre thermique du gaz était donné par la distribution la plus probable de ces états. À chaque configuration des molécules du gaz, on pouvait associer une probabilité ( $W$ ). Selon la relation de Boltzmann, l'entropie est proportionnelle au logarithme de cette probabilité ( $S = k \log W$ ). Un état d'énergie du gaz correspondait à un ensemble de « complexions » élémentaires, ou répartitions des molécules (pensées comme

individuellement marquées, ou discernables) dans chaque intervalle (ou cellule) de vitesse, d'égale probabilité. Boltzmann en calculait la probabilité en faisant le décompte des permutations des molécules d'une même cellule.

Pour Einstein, autant la formule de Boltzmann (où il voyait un principe général de la nature) était juste, autant cette définition combinatoire de la probabilité était peu physique et comportait une part d'arbitraire. Il proposa donc de réinterpréter la probabilité d'une manière physique, en y voyant la fréquence dans le temps des états possibles du système. Einstein retrouvait ainsi des résultats de mécanique statistique que Willard Gibbs venait de développer peu de temps auparavant, mais qu'il ne connaissait pas encore. En 1903, il publia un article intitulé « Une théorie des fondements de la thermodynamique », où il montrait comment déduire les concepts de la thermodynamique, tels que la température et l'entropie, de l'idée d'une constitution atomique de la matière et de la conservation de l'énergie, sans recourir aux hypothèses plus restrictives de la théorie cinétique. En 1904, il écrivait à son ancien condisciple (et son futur collaborateur pour les mathématiques de la relativité générale) Marcel Grossmann, qui préparait alors une thèse sur les géométries non euclidiennes : « Tu traites la géométrie sans l'axiome des parallèles, moi la théorie atomique de la chaleur sans l'hypothèse cinétique. »

Poursuivant sa réflexion sur le principe (ou formule) de Boltzmann, il s'aperçut, l'année suivante, que la constante qui y figure (la constante de Boltzmann,  $k$ ) permettait d'exprimer la stabilité thermique d'un système à travers les fluctuations de l'énergie de ce système, et de déterminer ainsi la valeur de  $k$ . Les fluctuations sont la conséquence de la définition physique des probabilités à partir de valeurs moyennes : qui dit valeur moyenne dans ce sens physique dit fluctuations autour d'elle. Ses travaux ultérieurs sur le mouvement des molécules comme ceux sur le rayonnement allaient prendre leur point de départ dans cette relation de fluctuation, dont le concept même provenait de sa critique des fondements de la thermodynamique de Boltzmann. Elle lui servirait de « sonde » pour mettre en évidence les propriétés caractéristiques des domaines étudiés.

Tout en développant ces idées, Einstein pensait au rayonnement thermique enclos dans un espace fini comme l'un des phénomènes où il serait possible de vérifier sa formule des fluctuations. Pour une dimension spatiale de l'ordre de la longueur d'onde du rayonnement, les fluctuations d'énergie, faisait-il remarquer dans l'article de 1904, « Vers une théorie moléculaire générale de la chaleur », sont « du même ordre de grandeur que l'énergie rayonnée dans l'espace », et sont donc détectables. Cette considération l'amena à son travail fondateur de la théorie des quanta de 1905. Avant même de se lancer dans cette voie, il réalisa qu'il existait un phénomène moléculaire déjà connu pour lequel la vérification de l'existence de fluctuations pourrait être immédiate : le mouvement brownien, dont il n'avait eu jusqu'alors qu'une connaissance très vague (le mouvement brownien est un mouvement aléatoire de petits corps en suspension dans un fluide, visibles au microscope). Il fit du problème des dimensions moléculaires l'objet de sa thèse de doctorat, qu'il soutint à l'Université de Zurich en 1905, sous le titre « Une nouvelle détermination de la dimension des molécules », et publia la même année un article sur sa théorie du mouvement brownien, le second de sa série de quatre articles parus en 1905 dans la revue *Annalen der Physik*, sous le titre « Sur le mouvement de particules en suspension dans un fluide au repos impliqué par la théorie cinétique moléculaire de la chaleur ».

## MOUVEMENT MOLÉCULAIRE ET THÉORIE DU MOUVEMENT BROWNIEN

Le mouvement brownien était supposé résulter de l'agitation thermique sous-jacente des molécules du liquide entrant en collision avec les particules en suspension, fournissant ainsi une illustration directe de la théorie cinétique. L'observation d'éventuelles fluctuations dans les mouvements des grosses particules serait rapportée à des fluctuations des mouvements moléculaires qui sont la cause des premiers, et leur mesure permettrait « la détermination exacte des vraies dimensions atomiques ». En étendant la notion de pression osmotique des molécules des corps dissous aux corps en suspension dans un liquide, Einstein obtenait le déplacement moyen des particules en suspension et les fluctuations autour de cette valeur. Il en déduisait diverses grandeurs physiques, telles que la constante de Boltzmann  $k$ , le nombre d'Avogadro ou le libre parcours moyen des molécules (distance parcourue entre deux chocs).

En donnant ainsi l'explication du mouvement brownien par les mouvements moléculaires, d'où s'ensuivait la détermination des grandeurs atomiques, la théorie d'Einstein établissait la réalité physique des atomes, longtemps niée par bien des physiciens qui, invoquant l'impossibilité de les observer directement ou au microscope, les considéraient comme échappant irrémédiablement aux sens et aux possibilités de la connaissance. Einstein avait développé une méthode théorique pour accéder à ce monde atomique invisible : en utilisant les probabilités comme fréquences d'événements ou d'états, et en étudiant les fluctuations de ces fréquences autour de leurs valeurs moyennes. Il allait aussi utiliser ce mode de raisonnement théorique dans un domaine qui paraissait tout à fait différent, celui du rayonnement et de la lumière, mettant, là aussi, l'invisible à la portée de l'entendement.

L'article intitulé « Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière » fut, en fait, chronologiquement le premier des quatre publiés par Einstein dans la revue *Annalen der Physik* en 1905. Il résultait, lui aussi, de l'application de ses considérations fondamentales sur la thermodynamique.

## L'ÉNERGIE QUANTIFIÉE DU RAYONNEMENT

Dans ce travail, Einstein abordait le problème posé par le rayonnement du corps noir d'une façon très différente de celle de Max Planck quelques années auparavant (en 1900). Un corps noir est une cavité fermée, chauffée, en état d'équilibre thermique entre le rayonnement émis et le rayonnement absorbé par les électrons (résonateurs) du milieu. Max Planck avait appliqué à la distribution de l'énergie du rayonnement dans le volume, à l'équilibre thermique, un calcul de répartition à la manière de ce que Boltzmann faisait pour les molécules d'un gaz. Pour rendre compte du spectre du rayonnement observé en fonction de la température, qui contredisait les calculs théoriques (fondés sur la théorie électromagnétique et la théorie cinétique), il lui fallait admettre que les énergies de rayonnement échangées avec les électrons

résonateurs étaient discontinues, proportionnelles aux fréquences selon la formule  $\Delta E = nh\nu$  ( $\Delta E$  est l'énergie échangée, transportée par le rayonnement de fréquence  $\nu$  ;  $n$  est un nombre entier ;  $h$  est une constante de proportionnalité, qu'Einstein appela constante de Planck).

Reprenant le problème général du comportement d'un rayonnement de faible densité d'énergie enfermé dans un volume, dont la loi était bien établie (loi de Wien), Einstein lui appliqua la formule de Boltzmann ; il obtint une relation entre l'énergie et la fréquence du rayonnement qui se présentait comme générale et indépendante des processus d'émission et d'absorption, et donc comme portant sur la nature même de la lumière. Il ressortait de son travail que le rayonnement thermique de fréquence  $\nu$  « se comporte du point de vue de la thermodynamique statistique, comme s'il était constitué de points matériels d'énergie  $h\nu$  », et que les résultats d'observation sont « plus compréhensibles si l'on admet que l'énergie de la lumière est distribuée de façon discontinue dans l'espace », sous forme de « quanta de lumière ». À la différence du résultat de Planck, dans celui d'Einstein, ce n'était pas seulement les échanges d'énergie entre matière et rayonnement qui étaient quantifiés, mais l'énergie du rayonnement lui-même.

L'hypothèse des « quanta de lumière » d'Einstein conduisait immédiatement à des conséquences intéressantes concernant des phénomènes de production et d'absorption de la lumière, qui étaient jusqu'alors en mal d'explication. C'était, en particulier, le cas de l'effet photoélectrique, observé par Heinrich Hertz en 1887 (lorsqu'on expose un métal à un rayonnement de fréquence élevée, le métal émet des électrons, mais, au-dessous d'une certaine fréquence, aucun électron n'est émis). Le caractère discret des énergies en jeu dans le rayonnement rendait compte directement des effets de seuil : pour qu'un électron soit émis, l'énergie du rayonnement qui lui était communiquée devait être supérieure à l'énergie de liaison qui maintenait l'électron à l'intérieur du métal. D'autres effets connus, comme la photo-ionisation, étaient également expliqués par cette propriété du rayonnement lumineux. Pour l'effet photoélectrique, la théorie d'Einstein prévoyait le parcours des électrons émis, qui serait mesuré quelques années après.

En développant son raisonnement, Einstein prenait soin de préciser sa conception physique des probabilités, entendues dans le sens de fréquences d'événements et de statistiques, qui permettait d'éviter l'arbitraire d'hypothétiques équiprobabilités : « Difficulté logique, précise-t-il, qui fait encore obstacle à la mise en œuvre du principe de Boltzmann. » Relevons encore l'« économie » dans le traitement théorique, qui délimite exactement son objet, et qui confère sa légitimité à l'hypothèse effectuée, sous bénéfice de vérification expérimentale des propriétés prédites. Aucune proposition de l'article de 1905 sur le rayonnement, si on le lit aujourd'hui, n'a besoin d'être révisée en regard des développements ultérieurs de la physique quantique.

À la différence des recherches que nous venons de décrire, celle « sur l'électrodynamique des corps en mouvement », qui fait l'objet du troisième article publié par Einstein en 1905, ne fut précédée d'aucune publication par son auteur sur le même sujet ou sur un sujet voisin. Il s'agissait d'un problème d'une importance considérable, posé par la théorie électromagnétique de James C. Maxwell dès sa formulation même, mais reprenant en fait une question plus ancienne, celle de l'optique des corps en mouvement, qui avait surgi avec la théorie ondulatoire de la lumière d'Augustin Fresnel dès son élaboration (vers 1818-1821).

## ÉLECTRODYNAMIQUE DES CORPS EN MOUVEMENT ET RELATIVITÉ RESTREINTE

La théorie de Maxwell faisant de la lumière une onde électromagnétique, le problème de son mouvement se confondait dès lors avec celui des effets du champ électromagnétique. La propagation de ce dernier était conçue comme celle d'ébranlements d'un milieu élastique emplissant l'espace, l'« éther » (comme la propagation des ondes lumineuses dans la théorie de Fresnel). Le problème de savoir comment le mouvement des corps modifiait les propriétés électromagnétiques liées à ces corps était encore à l'ordre du jour en 1905.

De nombreux physiciens s'étaient préoccupés des aspects théoriques et expérimentaux liés à cette question. La plupart d'entre eux avaient proposé des modèles théoriques des particules électrisées, sources des champs électriques et magnétiques. À la tendance, courante durant tout le XIX<sup>e</sup> siècle, de ramener tous les phénomènes à des actions mécaniques, avait succédé une « vision électromagnétique du monde » qui se proposait, à l'inverse, de réduire toutes les actions physiques à des effets de forces électromagnétiques.

Parmi les contributions sur le sujet publiées dans ces années-là, trois retiennent l'attention par la direction commune de leurs résultats, qui se révéla très vite être la bonne, à savoir l'indifférence (ou l'invariance) de la théorie électromagnétique par rapport au mouvement, résolvant ainsi un problème posé depuis près de 100 ans (les lois de l'électrodynamique restent valides quand on change de référentiel inertiel à condition d'utiliser les transformations dites de Lorentz). Deux des auteurs de ces contributions étaient très connus : Lorentz et Poincaré. Le troisième était encore un inconnu âgé de 26 ans : Albert Einstein. L'originalité et la fécondité de son approche du problème et de la solution qu'il proposait ont par la suite éclipsé les apports des autres, celui de Lorentz, publié en 1904 dans une revue scientifique hollandaise, et celui de Poincaré, terminé en juin 1905 et paru en 1906 dans une revue mathématique italienne.

Les trois contributions ont en commun, outre leur quasi-simultanéité, de prendre leur point de départ dans un ouvrage de Lorentz paru en 1895, *Essai d'une théorie des phénomènes électriques et optiques dans les corps en mouvement*. Lorentz y développait une théorie de l'électrodynamique qui appliquait les équations de Maxwell du champ électromagnétique aux électrons (dont les corps matériels étaient supposés être constitués), ces corps étant considérés aussi bien au repos qu'en mouvement par rapport à l'éther, supposé au repos dans un espace absolu. Poincaré avait proposé des améliorations à cette théorie des électrons de Lorentz ; leurs travaux avaient abouti à leurs articles respectifs de 1904-1905, correspondant à la formulation d'une électrodynamique relativiste. L'idée directrice de leurs travaux était la nécessité d'ajuster la théorie électromagnétique à certaines contraintes provenant d'expériences, et notamment des expériences d'optique, dont celle de Michelson et Morley. Ces contraintes empiriques étaient exprimées en termes de « contraction des longueurs » des corps dans le sens du mouvement, généralisée en invariance sous une transformation de coordonnées privilégiée, dénommée par Poincaré, en 1905, « transformation de Lorentz ». Le respect du principe de relativité en résultait.

## LA FORCE DES PRINCIPES

Einstein n'avait pas connaissance de ces travaux récents parallèles aux siens. Il méditait depuis longtemps (en vérité, depuis son adolescence) sur la lumière et sur le champ électromagnétique. Dans son article de 1905, il abordait le problème d'une façon très différente des recherches que nous venons d'évoquer. Il commençait par diagnostiquer une difficulté fondamentale dans la formulation de l'électrodynamique, et l'identifiait aussitôt en termes d'un conflit entre cette théorie et le « principe de relativité ».

La relativité des « mouvements d'inertie », rectilignes et uniformes, était bien connue en mécanique. En revanche, l'optique et l'électromagnétisme, qui font intervenir non seulement les corps, mais aussi l'éther (conçu comme absolument immobile), étaient généralement considérés comme ne devant pas respecter la relativité des mouvements, censée n'être valable que pour les corps seuls. Pourtant, tous les phénomènes optiques s'étaient révélés indépendants de l'état du mouvement des corps qui en sont le siège, comme Einstein le faisait remarquer, soulignant l'absence d'« anisotropie terrestre », ou effets dus au mouvement de la Terre, constatée par de nombreuses observations (faites par Arago, Fizeau, Mascart, Michelson et Morley). Mieux encore, il montrait que les phénomènes électromagnétiques eux-mêmes ne laissent admettre que des mouvements relatifs, en analysant l'une des plus caractéristiques, qu'il connaissait bien, l'induction électromagnétique. La théorie de Maxwell était, à cet égard, en décalage par rapport aux phénomènes, en donnant deux explications différentes suivant celui des deux objets que l'on considérait en mouvement par rapport à l'autre, alors que l'effet était le même dans les deux cas. Il fallait donc la réformer ; il fallait aussi reformuler la mécanique pour la mettre en accord avec l'optique et l'électromagnétisme.

Le reste de l'article est en puissance dans ces prémisses. La réforme conjointe de la théorie électromagnétique et de la mécanique est obtenue par leur confrontation, en gardant ce que chacune d'elles a de plus fondamental, à savoir : le principe de relativité pour la mécanique, la constance de la vitesse de la lumière indépendamment du mouvement de sa source pour la théorie électromagnétique. Si ces deux principes physiques paraissent à première vue incompatibles, c'est en raison des présupposés sous-jacents au concept d'éther (en repos absolu) et à la composition classique des vitesses en mécanique (les vitesses du mobile et de son repère s'additionnent). En effet, la vitesse de la lumière, fixée pour l'éther, ne pourrait être la même si on lui ajoute la vitesse du repère entraîné lié au corps, contredisant ainsi le principe de relativité. Einstein se rendit compte que, pour rendre les deux principes compatibles, il fallait abandonner l'addition des vitesses habituelle depuis Galilée.

Ayant formulé ainsi la difficulté, Einstein fut conduit à repenser les concepts d'espace et de temps. Il se souvenait des leçons apprises dans *La mécanique* d'Ernst Mach : la critique des concepts absolus newtoniens, et l'idée du caractère construit et provisoire des concepts de la physique. Il fallait rendre l'espace et le temps compatibles avec la description de situations physiques, les rendre physiques, en quelque sorte : ils devaient être reconstruits en étant soumis aux deux principes choisis. Il était dès lors possible d'exprimer les variables



d'espace et de temps pour un système physique donné dans deux référentiels en mouvement d'inertie relatifs, et le passage de l'un des référentiels à l'autre. Einstein obtenait ainsi des formules de transformations différentes de celles de la mécanique classique. Autrement dit, il démontrait directement les formules de transformation relativiste.

Cette réforme de la cinématique (dont des effets sont la contraction des longueurs et la dilatation des durées) entraînait une reformulation de la dynamique, qui donnait aux équations de Maxwell une forme respectant la relativité du mouvement ; Einstein mettait un point final aux difficultés de l'électrodynamique classique. Bien qu'elle ait résolu ainsi le problème de l'électrodynamique des corps en mouvement, la théorie développée dans l'article de 1905 ne s'identifie pas à ce seul résultat : son objet est plus large, au-delà de la dynamique particulière qui fut l'occasion initiale de son travail, et porte sur les conditions cinématiques en général, applicables à toute dynamique. Einstein la dénomma finalement (en 1911) « théorie de la relativité » (tout en remarquant qu'il aurait pu l'appeler aussi bien « théorie de l'invariance relativiste »). Le qualificatif « restreinte » ou « spéciale » serait ajouté plus tard pour distinguer la « théorie de la relativité générale », développée par la suite dans la même direction de pensée, mais guidée cette fois par la considération de la dynamique des champs de gravitation.

La théorie avait une autre implication immédiate, qui fit l'objet quelques mois plus tard d'un quatrième article d'Einstein dans les *Annalen der Physik* de 1905 : le lien entre la masse et l'énergie, que résume l'équation devenue célèbre  $E = mc^2$ , annonçant que « la matière est un réservoir d'énergie ».

## LE « STYLE » D'EINSTEIN

On sait l'importance des résultats obtenus par Einstein en 1905. Celui sur les quanta de rayonnement inaugura une série de recherches de sa part, tant sur les propriétés du rayonnement que sur celles de la matière atomique, qui eurent pour effet d'élargir le domaine de la physique des quanta à la constitution atomique de la matière, et de mettre en évidence quelques-uns des caractères particuliers des systèmes quantiques (comme la dualité onde-corpuscule de la lumière).

Dès ses premiers travaux, Einstein se rendit compte que la quantification de l'énergie du rayonnement lumineux était en contradiction avec la théorie électromagnétique classique, et qu'il fallait la remplacer cette dernière par une théorie plus fondamentale. Ses recherches ultérieures dans ce domaine sont menées dans le souci d'établir certains traits de la théorie souhaitée : c'est ainsi qu'on lui doit de nombreux jalons préparatoires de la théorie quantique.

En ce qui concerne la théorie de la relativité, le dépassement de son objet initial, l'électrodynamique, vers l'obtention de relations d'invariance susceptibles de conditionner toute dynamique, lui fit rencontrer, peu après, le problème de la généralisation de cette invariance pour tous les mouvements, et de la mise en accord du champ de gravitation avec l'invariance relativiste dans le sens général, c'est-à-dire pour des systèmes en mouvements accélérés quelconques. Cette voie ouvrit d'autres volets de son œuvre ultérieure : théorie de la relativité générale, cosmologie relativiste, recherche d'une théorie du champ continu unitaire.

Nous terminerons cette évocation des travaux d'Einstein au cours de son année admirable par une remarque sur une particularité de son « style » de chercheur. La suite devait montrer que les trois problèmes abordés en 1905 ne sont pas indépendants : ils concernent tous des propriétés de la matière. À cette époque, d'autres physiciens avaient tendance à les traiter ensemble, en tentant de les embrasser dans un même schéma théorique, ou de les expliquer par des modèles dynamiques. Nous avons déjà noté chez Einstein sa tendance à aborder les problèmes d'un point de vue « fondamental », qui commence par la critique des théories en jeu, la caractérisation précise de leurs insuffisances et le dépassement de ces insuffisances. Même le « point de vue heuristique » proposé pour son travail sur les quanta est sous-tendu par une perspective plus fondamentale et de plus long terme sur les exigences d'une théorie pleinement adaptée aux phénomènes. Cependant, ce souci pour le fondamental (tant pour les concepts que pour les théories elles-mêmes) s'accompagne d'une attention toute particulière à l'égard de l'objet étudié, non pas l'objet empirique étroit, mais l'objet envisagé dans sa description théorique, c'est-à-dire l'objet même de la théorie. C'est sous cet angle qu'Einstein procédait à l'examen critique des théories existantes, et ce serait un trait constant de ses travaux ultérieurs.

### TROIS ÉTATS DIFFÉRENTS DU RAPPORT DE LA THÉORIE À SON OBJET

Les trois problèmes étudiés en 1905 sont révélateurs de cette préoccupation pour une qualification précise du rapport entre la théorie et son objet, en premier lieu parce qu'ils sont traités indépendamment. Même si les problèmes concernant les atomes et le rayonnement ont une origine commune (la redéfinition physique de la probabilité), ils sont ajustés exactement en fonction de l'objet étudié (mouvement moléculaire, énergie du rayonnement). De façon plus caractéristique encore, le traitement de l'électrodynamique est complètement indépendant des deux premiers : le projet en vue y est le plus fondamental des trois, car Einstein renouvelle la perspective théorique du domaine en refondant, sur une base solide (aussi solide que la thermodynamique), celle de principes physiques, la théorie électromagnétique et la mécanique.

On aperçoit d'ailleurs une différence très nette entre les contenus du premier et du troisième articles de 1905, qui ont tous deux à voir avec le rayonnement : le premier (sur la quantification de l'énergie) n'est qu'un résultat partiel et préliminaire (il correspond, selon ses propres termes, à un simple « point de vue heuristique »), alors que le troisième (sur l'électrodynamique et la relativité) présente tous les traits d'une théorie fondamentale (une théorie « à principes », comme il l'expliciterait plus tard).

Pour les deux, le rapport de la théorie à son objet est bien différent, et il est significatif qu'Einstein les ait traités sans les faire communiquer. Et pourtant il aurait eu des raisons de le faire. En effet, dans son « Électrodynamique des corps en mouvement », Einstein constate que, dans le passage d'un repère à un autre, l'énergie et la fréquence d'un rayonnement, traitées indépendamment, ont la même loi de transformation, mais il ne fait aucune allusion à la relation, obtenue quelque temps auparavant, avec le premier article « Sur un point de vue heuristique », de

proportionalité entre ces deux quantités pour des quanta de lumière ( $E=h\nu$ ). Les deux relations avaient pour lui un statut théorique très différent dans la manière même dont elles avaient été obtenues. Il ne ferait état de cette coïncidence que plusieurs années après (en 1909, dans son exposé à la Conférence de Salzbourg), dans une de ses très rares tentatives de considérer ensemble la relativité restreinte et la physique des quanta, en soulignant la « cohérence » entre ces propriétés.

Il avait déjà une conscience particulièrement aigüe de la différence (voire du fossé) entre le traitement théorique du champ continu et celui des états discontinus (quantiques) de la matière, et cette conscience marquerait toutes ses recherches ultérieures.

---

Michel PATY est directeur de recherche émérite au CNRS (Équipe REHSEIS, CNRS et Université Paris-7 Denis Diderot) et professeur visiteur au Département de philosophie de l'Université de São Paulo (Brésil).

M. Paty, *La physique du xxe siècle*, EDP-Sciences, 2003.

M. Paty, *Einstein philosophe*, PUF, 1993.

---