

Editorial

LES ARRIÈRE-PETITS-ENFANTS

DE MAXWELL

par M. Georges LOCHAK

Il est des coïncidences historiques qui semblent marquées du destin, comme celle, souvent citée, de la naissance de Newton l'année de la mort de Galilée. Et comment ne pas songer cette année à cette autre coïncidence non moins singulière : celle de la naissance d'Einstein l'année de la mort de Maxwell ? Car s'il est une oeuvre qui influença Einstein, ce fut bien celle de Maxwell. Pourtant, lorsqu'on évoque la conception du monde d'Einstein, on s'étend principalement sur ses lectures philosophiques : Hume, Poincaré, Mach, Kant, voire Schopenhauer et Nietzsche; et on analyse avec soin ses affinités avec Spinoza. Mais Einstein était (faut-il le rappeler ?) un philosophe de la nature, un physicien, et sa conception du monde était avant tout une certaine image, un "Weltbild", selon le mot qui revient souvent chez Planck, comme chez lui-même et comme chez Louis de Broglie. Et cette image, pour lui, c'était celle d'un monde décrit entièrement par des champs continus : c'est tout au moins l'image à laquelle il rêvait et c'est pourquoi le dualisme des ondes et des corpuscules a constitué pour lui une aussi douloureuse énigme. Sa connaissance approfondie de l'électromagnétisme, dès ses plus jeunes années, n'est donc pas à mettre au rang de quelque connaissance technique (acquise d'ailleurs par lui-même, hors du Polytechnicum de Zürich) ; elle est, au contraire, au coeur-même de sa conception du monde. Ce n'est pas pour rien qu'on voyait dans son bureau trois portraits de physiciens : l'un d'eux était Newton, pour mille évidentes raisons, mais les deux autres étaient Faraday et Maxwell. Einstein, n'en doutons pas, a été influencé par plusieurs courants philosophiques, mais dès l'âge de vingt ans, c'est trop peu dire que l'oeuvre de Maxwell l'influença : il en était imprégné.

En cette Année Einstein, où la vie et l'oeuvre de l'illustre centenaire seront évoquées dans le monde entier, où notre Fondation, en particulier, lui consacra la totalité de ses séminaires, le présent numéro des "Annales" et encore d'autres travaux par la suite, rien ne serait plus injuste que d'oublier son génial devancier, James Clerk Maxwell, qui non seulement fut le créateur de la théorie mathématique du champ électromagnétique, mais fut aussi l'initiateur, avant Boltzmann et Gibbs, des méthodes statistiques en physique. Car Maxwell appartient à cette rarissime catégorie de physiciens, à laquelle appartient aussi Einstein, qui ont eu deux idées dans leur vie ! Et ce sont précisément les deux idées sur lesquelles s'est appuyée toute l'oeuvre d'Einstein et qui dominent la physique du XXe siècle : les statistiques et les champs.

Nous pouvons bien, à cet homme-là, mort il y a juste un siècle, consacrer quelques pages pour rappeler brièvement sa biographie et son oeuvre, avant de consacrer à Einstein le reste de ce numéro.

Maxwell est né à Edinburgh en 1831 (il descendait d'une grande famille écossaise, les Clerk) et on raconte sur son enfance et sa jeunesse les anecdotes typiques des scientifiques nés : dévorante curiosité, invention précoce de jouets scientifiques, etc. Il écrivit à 14 ans un mémoire remarquablement ingénieux sur la construction des courbes ovales, qui fut lu devant la Société Royale d'Edinburgh et, quatre ans plus tard, cette même société publia de lui deux mémoires, l'un en géométrie et l'autre en mécanique.

Il fit ensuite ses études au célèbre Trinity College de Cambridge et c'est alors qu'il s'y trouvait encore au titre de "post graduate student" qu'il fit un travail resté célèbre sur le mélange des couleurs et sur la physiologie de leur sensation. C'est dans ce mémoire qu'on trouve décrite la fameuse toupie colorée (ou le disque) de Maxwell et exprimés les principes sur lesquels se fonde aujourd'hui la reproduction photographique des couleurs. Mais, pendant ces mêmes années, Maxwell fit un travail moins remarqué de ses contemporains mais d'une tout autre portée : ayant étudié l'oeuvre de Faraday, il publia en 1855 un mémoire intitulé "On Faraday's Lines of Force" qui

constitue le début de son oeuvre sur l'électromagnétisme et dans lequel il formula pour la première fois, mathématiquement, la notion de ligne de force et introduisit celle de tube de force.

L'année suivante, à 25 ans, Maxwell quitta Cambridge (du moins comme étudiant, car il devait y revenir plus tard par la grande porte) et il devint professeur de Philosophie Naturelle à Aberdeen.

Là, il interrompit ses travaux sur l'électromagnétisme pour accomplir un brillant exploit en publiant en 1857 sa fameuse théorie des anneaux de Saturne, théorie qui nous intéresse ici non par elle-même, mais parce que c'est elle qui devait orienter Maxwell vers la théorie cinétique des gaz. En effet, les anneaux de Saturne posaient un vieux problème : connus depuis deux siècles (ils furent découverts en 1655 par Huyghens, mais déjà Galilée les avait aperçus), leur structure et leur stabilité restaient mystérieuses et c'est là le sujet qui fut mis en concours à Cambridge pour le prix Adams nouvellement créé et que Maxwell remporta. Reprenant tous les travaux antérieurs, notamment ceux de Laplace, Maxwell démontra qu'une structure solide, aussi bien que liquide, des anneaux était à écarter et que la seule structure stable en vertu des lois de la gravitation était une structure discontinue : celle d'un nuage de microsattelites.

C'est ainsi qu'il s'intéressa à la description d'un ensemble d'un grand nombre d'objets microscopiques et s'attaqua à la théorie cinétique des gaz qui n'en était encore qu'à ses débuts, avec un court article de Joule sur les vitesses d'agitation moléculaires et des mémoires de Clausius dans lesquels se trouvait déjà la notion de libre parcours moyen. En quelques années, se montrant aussi brillant expérimentateur que théoricien, Maxwell fit progresser la théorie de façon décisive et écrivit en 1860 un unique article, dans lequel on trouve déjà la démarche d'esprit qu'on retrouvera plus tard dans les articles d'Einstein sur des problèmes voisins, notamment sur le mouvement brownien : en particulier l'art de déduire les grandeurs microscopiques à partir de mesures macroscopiques simples. C'est ainsi que Maxwell sut déduire les longueurs des libres parcours moléculaires à partir de mesures sur la viscosité des gaz par une démarche analogue à celle d'Einstein qui calcula les dimensions moléculaires

à partir de mesures sur la viscosité des solutions diluées.

Mais la grande idée de Maxwell dans ce domaine fut l'introduction des méthodes statistiques. Certes, Clausius s'était déjà livré à un calcul de probabilité pour définir le libre parcours moyen, mais c'est Maxwell qui a compris le premier que les théories moléculaires allaient être le domaine des statistiques, que l'état d'un gaz ne se caractérise pas par une vitesse donnée des molécules, comme on le croyait avant lui, mais par une distribution de vitesses : celle qui, aujourd'hui, porte son nom. C'est incontestablement lui qui ouvrit la voie à Boltzmann, à Gibbs et à Einstein et ce dernier ne lui est pas seulement redevable de la théorie électromagnétique, mais encore des idées de bases sur les statistiques.

Cependant, c'est à la théorie des anneaux de Saturne que Maxwell dut d'être classé, très jeune, par ses contemporains, parmi les plus grands théoriciens de son temps, car ce problème était au centre des préoccupations de l'époque. Et c'est sans doute à cela, avant toute chose, qu'il dut sa brillante carrière : il fut nommé, dès 1860, au King's College de Londres puis, après s'être volontairement retiré dans son domaine familial en Ecosse durant quelques années, il fut appelé en 1871 à diriger à Cambridge la création du Laboratoire de Cavendish, promis à l'avenir que l'on sait, et dont il fut le premier professeur de physique expérimentale. Il devait y mourir d'un cancer, peu avant son quarante-huitième anniversaire, mais il avait sans doute réalisé pour l'essentiel son vaste projet, son rêve de jeunesse : il s'agit évidemment de la théorie mathématique du champ électromagnétique de Faraday qui, dans l'esprit de tous, éclipse aujourd'hui tous ses autres travaux.

Dès ses premiers mémoires sur l'électromagnétisme, Maxwell était parvenu à l'équation des champs stationnaires qui relie le courant électrique au rotationnel du champ magnétique et il développa une description du champ magnétique fondée sur un modèle mécanique dans lequel le magnétisme était relié aux tourbillons de l'éther. Ce modèle s'inspirait de l'idée des atomes-tourbillons de Kelvin, dont Maxwell faisait grand cas ; il est aujourd'hui bien oublié, mais ce fut lui qui inspira à Maxwell une idée géniale aux incalculables conséquences, qu'on trouve chez lui dès 1862-1864 : celle des courants de déplacement.

Autrement dit, c'est l'idée qu'un champ électrique variable au cours du temps crée, même dans le vide et les diélectriques, un courant capable d'engendrer un champ magnétique qui vient s'ajouter à celui dû aux charges en mouvement. Cette idée aboutit à la formulation des équations de Maxwell telles que nous les connaissons et à la théorie exposée dans son fameux "Traité d'électricité et de magnétisme" publié en 1873.

C'est au cours de ses travaux sur l'électromagnétisme, en se fondant sur l'équation des télégraphistes de Kelvin et sur ses propres équations, que Maxwell fut frappé par les résultats de Wilhelm Weber et de Friedrich Kohlrausch sur la propagation de l'électricité dans les câbles, qui montraient que la vitesse de propagation est sensiblement la même que celle de la lumière dans le vide. "Nous pouvons difficilement éviter la conclusion, écrivit-il, que la lumière consiste en des vibrations transversales du même milieu qui est la cause des phénomènes électriques et magnétiques."

Et ce fut à la fois la naissance de la théorie électromagnétique de la lumière et la prévision théorique de l'existence des ondes électromagnétiques que Hertz devait être, par la suite, le premier à observer et à étudier.

Voilà donc bien brièvement et approximativement résumées la vie et l'oeuvre de Maxwell.

Quel que soit l'éclat et les conséquences de ses travaux sur les théories moléculaires, qui font de lui, avec Boltzmann, l'un des principaux créateurs des théories statistiques, l'oeuvre de sa vie, à laquelle il consacra la meilleure part de son génie et vingt ans de travail, reste l'électromagnétisme qui fut sans doute, par lui-même et par ses prolongements, la plus grande source d'inspiration de la physique de notre siècle.

Vigny a écrit qu'"une grande vie, c'est un rêve de jeunesse réalisé dans l'âge mûr" et, incontestablement, la théorie électromagnétique a fait de la vie de Maxwell sinon un vie heureuse (cela nous l'ignorons) du moins une grande vie.

Malheureusement, la plupart de ses contemporains n'ont guère compris son oeuvre et se sont montrés plus experts à lui

faire des objections techniques (souvent légitimes, d'ailleurs) qu'à en apercevoir la portée. Du reste, même de nos jours, la plupart des manuels, reflétant mal la grandeur des idées, réduisent trop souvent les équations de Maxwell à quelques formules dont on ne retient guère que l'aspect opératoire et qui semblent plus ou moins aller de soi, maintenant qu'elles jouissent à la fois de la créance de tous et de la simplicité d'écriture que leur ont conféré les mathématiques modernes.

Mais les grands créateurs ne s'y sont pas trompés et ont reconnu l'audace de ses hypothèses, la suggestion profonde de ses formules et le caractère presque magique de leur capacité heuristique et de leur beauté formelle.

Ecoutez Boltzmann qui fut l'un des premiers à comprendre ses idées et à les diffuser et qui mit en épigraphe de ses "Leçons sur la théorie de l'électricité et de la lumière de Maxwell" ce vers extrait de la première tirade du Faust de Goethe : "War es ein Gott der diese zeichen schrieb ?" (Est-ce un dieu qui inscrivit ces signes ?).

Ecoutez Hertz qui écrivit : "On ne peut s'empêcher de penser que ces formules mathématiques ont une existence indépendante et une intelligence propre, qu'elles en savent plus que nous, plus même que ceux qui les ont découvertes et que nous en tirons plus de choses que l'on n'en avait mises à l'origine."

Mais, de toute l'oeuvre de Maxwell, s'il fallait extraire la quintessence : une seule idée qui dominerait les autres, que choisirions-nous ? Cela, nous le demanderons plutôt à Einstein, lui qui, à tant de titres, peut être regardé comme un descendant spirituel de Maxwell.

Einstein ne s'est-il pas révélé dès ses premiers travaux, dès l'âge de 21 ans, comme le plus grand homme de notre siècle en physique statistique et n'a-t-il pas joué l'un des tous premiers rôles, avec sa théorie du mouvement brownien, dans le triomphe des idées moléculaires dont Maxwell était l'un des initiateurs ?

Einstein ne fut-il pas aussi l'auteur de la plus grande théorie que l'électromagnétisme de Maxwell ait directement inspirée : la relativité, qui a donné à la théorie de Maxwell sa forme actuelle et dissipé les brumes dont l'hypothèse de l'éther enveloppait toutes les théories de l'optique depuis Fresnel ?

Mais Einstein n'est-il pas en même temps celui qui, avec l'hypothèse des quanta de lumière fit surgir, de la théorie électromagnétique de Maxwell qui venait à peine d'être admise par tous et de se répandre dans l'enseignement en faculté, une nouvelle question d'une si étonnante portée que trois quarts de siècle plus tard, elle se trouve encore au centre du débat en microphysique ?

Eh bien, en 1931, on a demandé à Einstein une contribution à un volume commémoratif édité à Cambridge à l'occasion du centenaire de Maxwell. Il a intitulé son article :

"L'influence de Maxwell sur le développement de la conception de la réalité physique."

Et quelle est donc l'unique question qu'Einstein a retenue ? On l'a deviné : c'est évidemment la notion de champ et le dualisme des ondes et des corpuscules. Car de même que, lorsqu'on dit à Louis de Broglie que c'est lui qui a donné à l'idée du dualisme des ondes et des corpuscules toute son ampleur, il ne manque pas de se récrier que le mérite premier en revient à Einstein, de même Einstein crédite-t-il Maxwell de l'honneur d'avoir posé le problème. En effet, tandis que nous avons l'habitude de regarder l'hypothèse des quanta de lumière d'Einstein comme l'intrusion du discontinu dans le monde continu de Maxwell, Einstein considérait au contraire que c'est la théorie du champ de Maxwell qui constituait une irruption du continu dans le monde discontinu de Newton. Mais nous ne saurions mieux faire que de citer deux passages qui résument la teneur de l'article d'Einstein :

*"En faisant abstraction, dit-il, de résultats importants mais particuliers obtenus par Maxwell au cours de sa vie dans différents domaines de la physique et, portant notre attention uniquement sur les changements qui sont intervenus grâce à lui dans nos représentations de la réalité physique, nous pouvons*

dire qu'avant Maxwell, la réalité physique, pour autant qu'elle doit représenter des processus dans la nature, était conçue sous la forme de points matériels dont les changements consistent seulement en un mouvement descriptible par des équations différentielles ordinaires. Après Maxwell, la réalité physique a été conçue sous la forme de champs continus irréductibles à une explication mécanique et décrits par des équations aux dérivées partielles. Ce changement de notre compréhension de la réalité est le plus profond et le plus fécond qu'ait subi la physique depuis Newton. Il faut ajouter également que la pleine réalisation de ce programme d'idées n'a pas encore abouti."

Puis, Einstein montre que toutes les théories actuelles ne sont que des compromis entre ce qu'il appelle le programme de Newton et celui de Maxwell et il termine en disant, à propos de la mécanique quantique qui est l'une de ces théories :

"... j'incline à croire que les physiciens ne vont pas longtemps se satisfaire d'une telle description indirecte de la réalité, même si on met la théorie en accord satisfaisant avec le postulat de la relativité générale. Alors nous devons revenir à la tentative de réalisation du programme que nous pouvons à bon droit qualifier de maxwellien, c'est-à-dire revenir à la description de la réalité physique au moyen de champs sans singularités et satisfaisant à des équations aux dérivées partielles."

Mais nous pouvons nous demander maintenant si Maxwell avait, lui-même, pris conscience de ce problème du dualisme qu'Einstein lui attribue. Eh bien oui, nous pouvons en être sûrs, car voici ce qu'il disait dans sa leçon inaugurale de 1871 au Laboratoire de Cavendish :

"Deux théories de la structure de la matière s'affrontent avec un succès variable depuis les temps anciens : la théorie de l'univers plein et celle des atomes dans le vide.

La théorie du remplissage de l'univers est liée à la doctrine de la continuité mathématique et ses méthodes sont celles du calcul différentiel qui apparaissent comme l'expression adéquate des relations entre quantités continues.

La théorie des atomes et de l'espace vide nous conduit à reconnaître l'importance de l'étude des nombres entiers et des relations finies. Cependant, dans l'application des principes dynamiques au mouvement d'un nombre immense d'atomes, la limitation de nos possibilités nous contraint d'abandonner toute tentative de décrire l'histoire exacte de chaque atome et de nous contenter du calcul de l'état moyen d'un ensemble d'atomes suffisamment grand pour être visible. Cette méthode consistant à opérer avec des ensembles d'atomes, qu'on peut appeler la méthode statistique et qui, dans l'état actuel de nos connaissances, est la seule méthode efficace pour étudier les corps réels qui se trouvent à notre disposition, implique le renoncement aux principes purement dynamiques et l'adoption de méthodes mathématiques appartenant au calcul des probabilités. Il se peut qu'en appliquant ces méthodes qui nous sont encore inhabituelles nous atteindrions d'importants résultats. Si la véritable histoire des sciences avait été différente et si les doctrines scientifiques les plus habituelles et les plus familières avaient été celles exprimées par lesdites méthodes, alors il est probable que nous aurions pris l'existence d'une certaine part de hasard pour une vérité d'évidence et que nous aurions considéré la doctrine philosophique du déterminisme comme un pur sophisme."

Voici donc, exprimée à plus d'un siècle de distance, à une époque où ni la théorie du champ ni les théories statistiques n'avaient encore triomphé, la grande interrogation de notre siècle, celle d'Einstein lui-même : continu et discontinu, déterminisme et hasard.

Comment, après cela, ne pas voir un signe du destin dans cette naissance d'Einstein l'année de la mort de Maxwell ? Mais malgré cette coïncidence Einstein appartenait en fait à la deuxième génération qui a suivi Maxwell.

La génération des fils spirituels de Maxwell, c'était celle de Hertz, Lorentz et Planck : les deux premiers ont donné à sa théorie la forme achevée que nous lui connaissons, mais déjà Lorentz et Planck posaient sous une forme acérée le grand problème des interactions entre la matière et le rayonnement ou, pour parler comme Einstein, les interactions entre ce qui était encore le monde de Newton et ce qui était déjà le monde de Maxwell. Il n'est pas étonnant que leur génie ait pu léguer à

la génération suivante les deux problèmes majeurs qui se sont trouvés à l'origine de la physique de notre siècle : l'électrodynamique des corps en mouvement et la théorie des quanta.

Cette génération suivante, ce fut celle d'Einstein, de Broglie et Schrödinger, qu'on pourrait appeler les petits-fils de Maxwell, et si nous ne citons que ces trois noms sur tout un siècle, il ne faut évidemment pas y voir un palmarès qui écarterait les autres grands physiciens de leur génération mais les trois symboles d'une famille d'esprit, encore qu'il s'agisse bien d'une famille, et non d'une école, car leurs lignes de recherches personnelles ont toujours été nettement distinctes, malgré leurs affinités, en raison de leur génie propre et d'un individualisme profond de chercheurs solitaires.

Schrödinger, radicalement moniste, voulait un monde peuplé d'ondes et d'ondes seulement et interprétait dans ce seul langage sa célèbre équation. Louis de Broglie est sans doute le plus dualiste des trois et veut décrire une sorte d'alliance, d'association, entre les particules et les ondes dans son interprétation de la mécanique ondulatoire par la théorie de la double solution. Quant à Einstein, l'homme qui s'est "taillé la part du lion" dans la physique de notre siècle (c'est ce qu'il disait lui-même de Maxwell à propos de la théorie du champ), l'homme autour duquel aura tourné toute notre physique, que ce soit pour le suivre ou pour le contredire, il était, on le sait, moniste lui aussi, ainsi qu'on le voit bien dans les citations que nous venons de reproduire. Pourtant, quoiqu'il en dise, c'est bien lui qui a posé de façon brûlante le problème du dualisme qui a été suivi du cortège que l'on sait d'éclatants résultats et en même temps d'énigmes et de disputes toujours vivantes. Ce problème a poursuivi Einstein toute sa vie, sans qu'il y trouve de réponse qui le satisfasse et Léon Brillouin avait raison de dire avec humour, à propos du photon : "C'est pour cette découverte que le prix Nobel fut attribué à Einstein en raison de tant d'évidence expérimentale de sa réalité physique. Cependant, Einstein n'a jamais aimé son photon autant que sa bien-aimée relativité. Le photon était un enfant naturel né hors mariage ; Einstein a conservé sa forte croyance en les équations différentielles dans un milieu continu. Les discontinuités et les quanta ne lui semblaient pas naturels." Et il est vrai que toute la vie d'Einstein a été une longue quête vers la solution du problème du dualisme

des ondes et des corpuscules.

Nous allons, un peu plus loin, laisser s'exprimer sur ce sujet une voix autrement autorisée que la nôtre, celle de Louis de Broglie, et il est remarquable que lorsque nous lui avons demandé un article, il a relu ce vieux discours de 1955, celui qu'il avait prononcé à la mort d'Einstein, et nous a conseillé simplement de le reproduire sans modification, en ajoutant seulement, oralement, qu'il aurait, aujourd'hui, rédigé la fin sur un ton plus optimiste. Il est probable, également, que si nous avions pu demander à Einstein un article sur Maxwell, il nous aurait donné celui de 1931, en regrettant sans doute que les physiciens aient pu si "longtemps se satisfaire d'une telle description indirecte de la réalité", ainsi qu'il qualifiait, on l'a vu, la mécanique quantique. Mais les grands problèmes de la physique progressent toujours lentement, aujourd'hui comme hier, et celui-ci reste posé. Il est légué, maintenant à la génération présente, celle des arrière-petits-enfants de Maxwell. Puissent-ils, à l'exemple de Maxwell et d'Einstein, toujours "garder la plaie ouverte" et poursuivre la réflexion personnelle et le débat, écarter tout dogmatisme et tout esprit de chapelle, tout en sachant conserver une des vertus cardinales de l'homme de science qui est l'indépendance d'esprit, ne refuser aucun problème qui se pose, même si on ne l'aime pas, ne jamais perdre foi en la possibilité d'un Weltbild, mais rester prêt à convenir, si les faits l'imposent, que ce Weltbild, après tout, n'est peut-être pas celui qu'on croit.