

Hommage
de l'auteur

L'ÉLECTRICITÉ

SES HYPOTHÈSES

ET

SES THÉORIES SUCCESSIVES

PAR

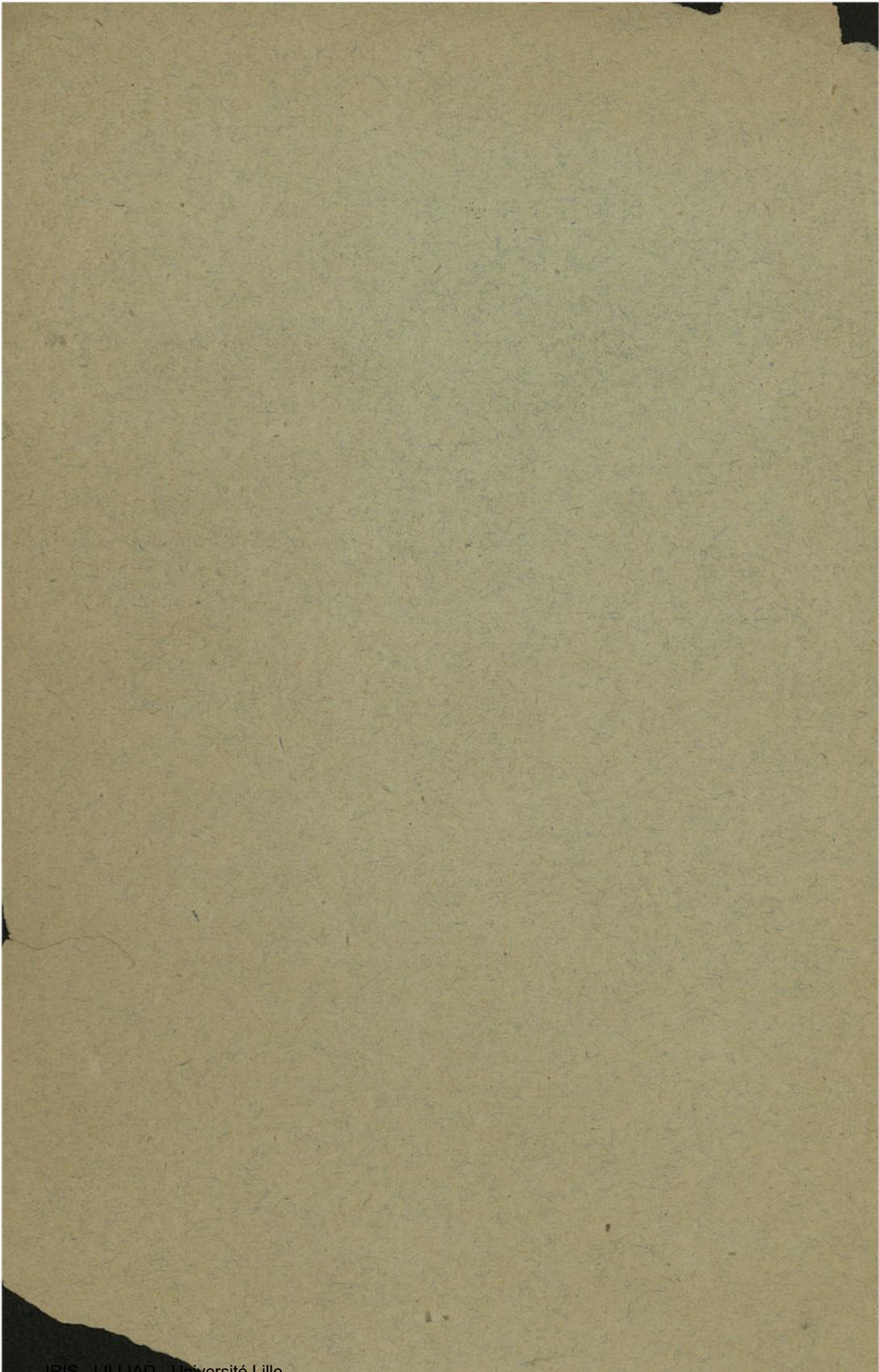
A. WITZ

Doyen honoraire de la Faculté catholique des Sciences de Lille
Correspondant de l'Institut

Extrait de la *Revue des Questions scientifiques*, 1920, 1921.

LOUVAIN
IMPRIMERIE FR. CEUTERICK
60, RUE VITAL DECOSTER, 60

1921



~~7521~~ 7/10/33

vIT. 16. RAY. 3.

MUSÉE COMM
et COLON
2, Rue du Lou
LILL



Amou ~~ville de Lille~~ de la ville de Valenciennes
le Dr Vanoy

Amicitia

BMIC 48

L'électricité, ses hypothèses et ses théories successives

5/10/03

1157

W. RAY



L'electricité : ses hypothèses et ses théories successives

N° Bib 388544/ - 465112



L'ÉLECTRICITÉ

SES HYPOTHÈSES

ET

SES THÉORIES SUCCESSIVES

PAR

A. WITZ

Doyen honoraire de la Faculté catholique des Sciences de Lille
Correspondant de l'Institut

Extrait de la *Revue des Questions scientifiques*, 1920, 1921.

LOUVAIN
IMPRIMERIE FR. CEUTERICK
60, RUE VITAL DECOSTER, 60

—
1921

L'ÉLECTRICITÉ

SES HYPOTHÈSES

ET

SES THÉORIES SUCCESSIVES

PAR

A. WITZ

Docteur honorifique de la Faculté catholique des Sciences de Lille
Correspondant de l'Institut

Extrait de la Revue des Questions scientifiques, 1931, 1932.

LOUVAIN

IMPRIMERIE P. CEUTRICK

100, RUE VITAL DEOSTRER, 100

1931

CHAPITRE I

VALEUR DES THÉORIES PHYSIQUES

« Qu'est-ce qu'un courant électrique ? » se demandait Joseph Bertrand, en 1887. — « Nul ne le sait, et bien peu croient le savoir. » (1)

La fine ironie qui perce entre chacun des mots de cette phrase lapidaire a encore réduit le petit nombre de ceux « qui croyaient savoir ». Si Joseph Bertrand, l'illustre Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, qui professait depuis vingt-cinq ans un cours d'électricité au Collège de France et achevait de rédiger ses brillantes leçons sur *la Théorie Mathématique de l'Électricité*, publiées en 1889, ignorait même ce qu'est un courant, qui osera garder encore l'illusion de rien connaître de l'induction et des rayons X ?

Le scepticisme de Bertrand ne se limitait point à ces branches de la physique, de plus récente venue, il s'étendait à toute cette science : écoutons-le, en effet, continuer son monologue. — « Savons-nous mieux ce qui se passe dans tout autre phénomène physique ? Qu'est-ce que la chaleur ? Quel est le mécanisme de la pression des gaz ? Notre ignorance est-elle moins complète ? » (2).

(1) J. Bertrand, *Thermodynamique* (Paris, Gauthier-Villars, 1887), p. 274.

(2) J. Bertrand, *Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Électricité* (Paris, Gauthier-Villars, 1889), p. 144.

Le mathématicien Bertrand n'était, du reste, pas le seul sceptique de son espèce : voici ce que pensait de ces questions un autre maître, plus physicien et plus profond penseur que lui, dont la postérité placera le nom à côté, si ce n'est au-dessus du sien : « Quand une théorie scientifique, écrivait Henri Poincaré, en 1905 (1), prétend nous apprendre ce qu'est la Chaleur, ou l'Électricité, ou la vie, elle est condamnée d'avance ; tout ce qu'elle peut nous donner n'est qu'une image grossière ». Et, dans la Préface-Introduction d'un de ses plus profonds Traités, il déclarait encore à son lecteur (à son disciple), que les théories « n'ont pas pour objet de nous révéler la véritable nature des choses : ce serait, ajoute-il, une prétention déraisonnable » (2). Elles peuvent conduire à des représentations approchées des choses ; mais, semblables à des miroirs déformants, elles sont impuissantes à nous les faire connaître telles qu'elles sont ; elles présentent, dit un autre, certaines explications ; toutefois celles-ci ne constituent « guère qu'une sorte de parodie de la vérité » (3). Les éléments des corps, auxquels elles attribuent une figure, doivent être considérés comme « de pures inventions de notre esprit, des noms que nous faisons substance, des mots auxquels nous prêtons une réalité » (4) ; pour le coup, c'est un chimiste-physicien qui parle, non moins illustre que les précédents, Henri Sainte-Claire Deville.

Ces citations mettent en lumière une doctrine qui est très répandue et très à la mode aujourd'hui ; elle a même été énoncée un jour à la Chambre, par un

(1) Henri Poincaré, *La Valeur de la Science* (Paris, Flammarion, 1905), p. 267.

(2) Henri Poincaré, *Théorie mathématique de la lumière* (Paris, Carré et Naud, 2^e édition, 1892).

(3) Lodge, *Modern Views of Electricity*.

(4) Henri Sainte-Claire Deville, *Leçons sur l'affinité* ; (BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS, 1867).

député qui avait enseigné la philosophie dans une Faculté avant d'être le *leader* du parti socialiste en France : « L'admirable savant qui a écrit un jour : le Monde n'a plus de mystère, me paraît avoir dit une naïveté aussi grandiose que son génie » (1).

Mais restons sur le terrain de la science avec les hommes de science et ne parlons que leur langage. Les théories physiques ne peuvent rien nous apprendre sur la raison d'être des lois et sur la nature des phénomènes qu'elles régissent : voilà la thèse. « L'ignorance qui se connaît » de Pascal est érigée en système : ce n'est plus celle dont on n'a pas conscience ou qui se dissimule avec candeur ; nullement : on l'avoue, on la professe, on la proclame bien haut et l'on s'en fait honneur.

Elle porte sur des mystères que nous sommes, dit-on, incapables de pénétrer, parce qu'ils sont transcendants à l'expérience et dépassent la portée de nos intelligences. Cette conviction d'impuissance entraîne le sacrifice d'illusions complaisamment caressées par des esprits qui avaient la foi trop facile par défaut de critique et formulaient, au jugé, des conclusions mal justifiées et quelquefois ridiculement prétentieuses.

Que restera-t-il dès lors de ces glorieuses théories, signées des noms les plus grands et les plus illustres, de ces ingénieuses et suggestives hypothèses, dont la description a bercé notre enfance, chanson d'autant plus chère à nos souvenirs qu'elle était plus endormante ?

Au dire des uns, il n'en resterait donc rien que des artifices de langage et des formules commodes, d'une utilité passagère ; et l'on remise dédaigneusement ces défroques démodées dans le coin perdu du vestiaire

(1) Jean Jaurès, *Discours prononcé à la Chambre des Députés*, le 21 janvier 1910.

où deviennent la proie des vers celles qui ont cessé de servir parce qu'elles ont cessé de plaire.

Le progrès des idées impose dès lors aux chercheurs un changement d'objectif de leurs travaux et aux savants un renversement d'idéal !

D'autres, au contraire, moins entiers et moins absolus dans leurs jugements, estiment que ces vêtements de la pensée des maîtres qui sont les fondateurs de nos connaissances scientifiques gardent toujours quelque chose de la beauté qui avait conquis les suffrages de leurs contemporains ; que les conceptions de si puissants esprits n'ont pas été entièrement tissées de rêves et d'illusions et que, pour ne point posséder la certitude du carré de l'hypoténuse, elles renferment néanmoins une part de vérité, dont leur fécondité même a été un garant irrécusable. Les utilités que ces méthodes ont procurées, les découvertes auxquelles elles ont conduit nos pères, non moins que la force des raisonnements et le charme des doctrines, doivent les sauver du dédain d'un savoir, plus averti assurément, mais devenu trop circonspect et imbu d'un criticisme exagéré. Elles font partie du patrimoine inaliénable de la science que les générations se lèguent l'une à l'autre : qu'on les accepte sous bénéfice d'inventaire et en formulant de prudentes réserves, soit ; mais qu'on ne les repousse pas *a priori*, en bloc, sans distinguer, en leur déniaut toute valeur. Les lois du Monde sont écrites dans une langue qui n'est pas la nôtre et dont les caractères ne sont pas encore tous connus ; mais nous commençons à déchiffrer ces hiéroglyphes. Si une première version présentait d'inévitables méprises, on peut compter qu'elles seront corrigées et qu'un jour viendra où le texte mystérieux sera traduit assez fidèlement pour être compris, du moins dans ses grandes lignes.

Les savants semblent se partager ainsi entre deux écoles, de manières de voir opposées : d'un côté, les tenants des anciennes traditions, de l'autre, ceux que j'aurais appelés les modernistes, si le mot n'était déjà occupé dans une acception malsonnante ; que je qualifierai de modernisants, parce que leur mentalité correspond aux tendances supercritiques positivistes et par-dessus tout sceptiques de notre époque. On les désigne aussi par le nom de pragmatistes, qu'on met en face de celui de dogmatistes (1) ; mais nous n'attachons pas grande importance à ces dénominations, essentiellement discutables. Ce qui ne l'est pas, c'est l'antagonisme des idées des deux groupements. Nous aurons à nous prononcer entre eux, avant d'aborder, comme nous comptons le faire plus tard, l'examen des hypothèses qui ont régné tour à tour en Electricité. Il serait peu sérieux, en effet, de prétendre caractériser les traits de ressemblance que ces images présentent avec la réalité, si l'on n'établissait d'abord qu'elles peuvent en offrir une. Nous entrerons donc en matière par des considérations générales sur l'origine et le développement des hypothèses et des théories de la physique et la valeur qu'on doit leur attribuer.

Qu'est-ce que la science peut connaître et comment peut-elle le connaître ?

Pour répondre à cette question, il faut étudier les procédés et la manière d'arriver au vrai de la science.

Rendons-nous compte d'abord de ce qui constitue essentiellement la méthode scientifique.

Suivant un ordre logique plus que chronologique,

(1) Au mot *pragmatique* on lit dans Littré : « Néologisme emprunté aux Allemands... qui tire des faits étudiés en eux-mêmes leur esprit, leur ordre et leur liaison nécessaire ». Le mot *pragmatiste* ne se trouve pas dans le Dictionnaire, non plus que dans le grand dictionnaire Larousse.

nous marquerons trois étapes du savoir, trois degrés dans la connaissance du monde extérieur.

Au premier degré, les phénomènes sont observés au jour le jour, au petit bonheur, comme ils se présentent ; la curiosité humaine progressivement éveillée note plus ou moins judicieusement, par le gros et par le détail, surtout par le détail, les circonstances de leur production. La découverte du fait naturel est suivie d'une expérimentation faisant naître dans des conditions provoquées, offrant un caractère souvent artificiel, une répétition de ces circonstances. Cuvier a dit que l'observateur écoute la nature, alors que l'expérimentateur l'interroge ; il a même ajouté que ce dernier la force à parler. Est-il déjà un savant ? C'est du moins un érudit. Il accumule un amas de faits, compilation désordonnée et confuse de documents qu'il se préoccupe médiocrement de débrouiller, de crainte de s'y perdre. Le temps se chargera de décider de leur valeur : pour le moment, on veut tenir compte de tout, plus soucieux de ne rien laisser échapper que de consigner uniquement sur ses tablettes des faits indiscutables. Joignant l'exemple au précepte, le chancelier Bacon étudie donc les dilatations produites par la chaleur ; Galilée, qui a suivi du regard les oscillations de la lampe du dôme de Pise, étudie le mouvement du pendule ; déconcerté par la rapidité de la chute des graves, il les fait rouler le long d'un plan incliné ; Messieurs de l'Académie de Florence repèrent des températures sur leur thermoscope ; Salomon de Caus s'intéresse à la tension des vapeurs saturées, Gilbert aux aimants et à l'arc-en-ciel, J. B. Porta aux images réelles qui vont se peindre au fond de la chambre noire, etc. On collectionne donc avec ardeur des observations variées et l'on marque d'une croix celles qui paraissent mériter d'être retenues ; en rangeant leurs acquisitions, ces infatigables « prospecteurs » commen-

cent alors à y mettre un peu d'ordre. D'instinct, leur recherche s'oriente vers un but déterminé, vaguement entrevu ; un premier travail de pensée accompagne celui de leurs mains ; toutefois c'est encore le règne de l'empirisme.

Mais voici que les savants correspondent entre eux, se font part de leurs trouvailles, les discutent et les soumettent à un examen sévère, j'allais dire à un criblage, qui leur permet de les trier et de séparer l'ivraie du bon grain. Par induction (1), ils rattachent entre elles les constatations faites à l'aide de méthodes diverses ; il y découvrent des rapports de dépendance et un mode d'action permanent des forces naturelles. L'ordre, la succession dans les phénomènes leur suggèrent des formules simples, résumant, dans leur généralité, un grand nombre de cas individuels ; ce sont des *lois*, dont ils ébauchent les énoncés. Prenons un exemple. Les PP. Mersenne et Noël, Ricci, Descartes, Pascal échangent leurs vues sur l'expérience de Torricelli : Pascal émet l'idée que la pesanteur de l'air pouvait bien être cause des effets que l'on avait jusqu'alors attribués à « l'horreur de la nature pour le vide ». L'idée de l'air pesant se répand, l'idée du vide se précise. Otto de Guericke en appelle à l'expérience pour mettre fin à des controverses qui menaçaient de rester stériles et il invente la machine à faire le vide ; puis il déduit de l'expérience de Boyle, de la vessie aplatie qui se gonfle dans l'air rarefié, que l'air est un fluide élastique, éminemment expansible et compressible ; Mariotte et Boyle annoncent alors simul-

(1) L'induction, dit M. Lachelier, est le « raisonnement par lequel nous érigeons en lois universelles des rapports de causalité dûment constatés » ; elle diffère de la déduction, qui tire des faits certaines vérités qui y étaient implicitement contenues.

tanément que « l'air se condense précisément selon la proportion des poids dont il est chargé » ; qu'à la condition que la température reste invariable dans l'opération, le volume d'une masse donnée est toujours d'autant moindre que la pression qu'il subit est plus considérable. La science, née de l'expérience et fondée sur elle, se développe ainsi progressivement ; elle continue d'approvisionner des recettes et des préceptes, en s'efforçant de remonter à l'origine commune des actions constatées ; elle reste simplement expérimentale, mais est déjà au-dessus du vulgaire empirisme, autant que la loi est au-dessus du fait isolé.

Les lois se corrigent peu à peu : il y a de multiples variétés d'air : l'air vital, inflammable, irrespirable, phlogistique et déphlogistique, etc. ; ce sont des gaz différents, auxquels la loi de Mariotte ne s'applique pas également bien.

Les lois se multiplient et toutes les branches de la science se développent tour à tour, la dioptrique et la catoptrique, le magnétisme comme l'électricité, à laquelle Boyle semble avoir donné son nom (1).

Cette ascension continue du fait isolé aux lois expérimentales (purement expérimentales), spéciales à chaque espèce de phénomènes, et aux applications pratiques que l'on pouvait en faire, s'était accompagnée d'un progrès non moins décisif pour l'avancement de la science. Les énoncés des lois, qui n'avaient d'abord été que qualitatifs, étaient devenus quantitatifs, ainsi que nous venons de le voir ; la question du *combien* s'était donc ajoutée à celle du *comment*. Ce fut un grand pas, et lord Kelvin l'a caractérisé plus tard par ces mots : « Si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et l'exprimer par un nombre, vous savez quelque chose de votre sujet ; mais si vous ne pouvez pas le

(1) Boyle, *De mechanica electricitatis productione* ; Genève, 1694.

mesurer, si vous ne pouvez pas l'exprimer par un nombre, vos connaissances sont d'une pauvre espèce et bien peu satisfaisantes » (1).

Voyons comment ce résultat si désirable avait été obtenu.

Les lois s'appliquent à des objets que l'expérience nous fait connaître et dont elle nous permet de spécifier les propriétés caractéristiques. Le physicien prend séparément, les uns après les autres, les divers objets sur lesquels portent les lois qu'il a formulées qualitativement ; il en crée des entités spéciales, sans s'occuper autrement de ce qu'ils sont ; mais, à chacun d'eux, il fait correspondre une grandeur dont la notion représente à son esprit les propriétés les plus immédiates relevées par ses observations. Il lui a fallu procéder à une étude complète des phénomènes pour établir ces notions et les discerner nettement les unes des autres, sans confusion, ni répétition ; il a eu besoin d'une méthode sûre et éclairée pour les définir. Ces concepts algébriques ou géométriques (grandeurs scalaires ou vectorielles) (2) se prêtent à des comparaisons, puis à des mesures ; ils sont par conséquent exprimables par des nombres, en fonction d'unités choisies d'abord arbitrairement, au gré des tendances et de la fantaisie de chacun, et qui ne seront unifiées en un système rationnel et cohérent que beaucoup plus tard. Mais dès que la grandeur a été mesurée, elle peut être représentée numériquement et entrer dans

(1) J'emprunte cette citation à *La Physique moderne*, de M. Lucien Poincaré (Paris, Flammarion, 1909), p. 22.

(2) Les premières ne sont que des grandeurs numériques, les secondes des grandeurs dirigées dans l'espace, ayant à la fois une valeur numérique et une orientation. Les densités, les températures, les chaleurs spécifiques, les capacités électriques, le potentiel, l'énergie, appartiennent à la catégorie scalaire ; à l'autre, les vitesses et les accélérations, les forces, les intensités des courants, etc. Celles-ci s'additionnent géométriquement : les premières définies par un paramètre, que l'on suppose continuellement variable, s'ajoutent algébriquement les unes aux autres.

les formules qui expriment les lois quantitatives ; le savant écrit dès lors, sous la forme analytique, les rapports découverts entre les faits, et il fait appel aux mathématiques, qui ne surajoutent aucune connaissance à ce que l'expérience a appris, mais sont un merveilleux instrument de travail, parce qu'elles allègent le langage en l'abrégeant et soulagent l'esprit en lui apportant un puissant concours.

Jusqu'ici la science avait donc moissonné des faits, puis elle les avait groupés, pour énoncer les lois, et elle avait traduit ces lois en des formules précises ; il lui restait à achever son œuvre de synthèse et à la parfaire, en groupant les lois pour en constituer une *doctrine* et édifier des *théories* ; ce sera l'œuvre capitale du savoir arrivé au troisième stade de son développement. On va maintenant classer, coordonner et enchaîner des lois.

Elles avaient été rattachées provisoirement entre elles par un lien de fortune, noué sur le terrain même, à mesure que les gerbes avaient été formées : en portant celles-ci au gerbier, les praticiens avaient déjà jugé nécessaire d'opérer entre elles un certain rangement, qui permettrait de les retrouver aisément au moment où l'on voudrait en disposer. Mais l'intelligence voit au delà des commodités de l'emploi ; plus elle sait, plus elle éprouve le besoin de savoir davantage ; plus elle étend ses limites, plus elle sent le besoin de lumière ; plus elle amoncelle de données, plus elle a soif d'ordre. « Ordonner, voilà bien, en effet, le mot qui résume toute investigation digne du nom de science » (1) ! Mais, pour ordonner, il faut connaître. On ne connaîtra que si l'on comprend. A la question du *comment* et du *combien* se superpose donc la ques-

(1) A. de Lapparent, *Science et Apologétique* (Paris, Bloud, 1908), p. 94.

tion du *pourquoi*. Pourquoi la chaleur dilate-t-elle les corps et fait-elle passer les corps de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état de vapeur? Pourquoi le fer est-il attiré par l'aimant et pourquoi celui-ci n'attire-t-il pas le cuivre? Pourquoi le prisme ou le réseau dispersent-ils la lumière?

Pour résoudre ces problèmes, l'expérimentateur se doublera d'un penseur, le physicien, d'un philosophe; ce dernier recevra du premier les documents et il les interprétera. Pour cela, il aura recours à un nouveau procédé d'investigation, à un procédé qui lui est propre. Pour grouper les lois et les solidariser d'une façon systématique, pour découvrir entre elles quelque chose de commun, il est amené à imaginer des relations entre les choses régies par les lois; il fait alors des suppositions sur leur nature intime ou leur manière d'être, il forge des *hypothèses* (1).

Celles-ci sont de diverses espèces.

A une époque qui n'est pas encore loin de nous, l'hypothèse s'appliquait généralement à un agent, à un *substratum* auquel on prêtait l'existence et les propriétés qu'il fallait pour qu'on se rendit compte des phénomènes observés. Les effets de la chaleur ont ainsi été attribués longtemps à une substance *sui generis*, le feu, la matière ignée, le phlogistique, le calorique, qui s'infiltrait dans les corps, s'y condensait ou s'y raréfiait à la façon d'un gaz subtil; substance matérielle, mais ne se marquant pas à la balance, donc impondérable; émise par les corps chauds, traversant les diathermanes, sans y rien laisser, arrêtée en partie plus ou moins grande par les athermanes doués d'un pouvoir absorbant; cheminant de proche en proche dans les conducteurs, y opérant des effets variés en

(1) Il n'est pas inutile de rappeler que le mot « hypothèse » vient du verbe ὑποτίθημι, qui implique une supposition, « supposition » étant dérivé du verbe *supponere*, placer à la base.

persistant toujours, car on le disait indestructible. La même tendance à matérialiser les agents physiques a fait admettre que la lumière est due aussi à un transport de particules ; pour expliquer les diversités de couleur des corps rayonnants, Newton a dû supposer des particules rouges, orangées, jaunes, etc. ; en faisant intervenir ensuite une attraction différente de chaque corps réfringent pour chacune d'elles, il a fourni une explication des phénomènes de réfraction et de dispersion, et la loi de la décomposition de la lumière par les lames minces a elle-même trouvé place dans ce cadre. Les phénomènes d'électrisation et les actions attractives ou répulsives qui les accompagnent ont de même donné naissance au concept d'une matière dite électrique, entité unique ou double, suivant que l'on fasse état d'un seul fluide, « en plus ou en moins », comme disait Franklin, ou de deux fluides, le résineux et le vitré, ainsi que les nommaient Dufay et l'abbé Nollet, en attendant qu'on les affectât des signes + et —, pour mettre en vedette leur neutralisation par addition algébrique. Le magnétisme a eu de même ses deux fluides, austral et boréal, Nord et Sud.

Le plus ordinairement, les hypothèses consistent en conjectures relatives à la constitution des corps et à leurs manières d'être. Telles sont les hypothèses atomistiques. La continuité que nos sens croient reconnaître dans un fragment de platine ou de silex n'est qu'apparente ; ce solide est discontinu et formé de particules d'une ténuité extrême, de masse déterminée, en nombre fini, mais immense ; elles sont insécables (leur nom prétendait l'indiquer), parce que ces éléments sont dénués de dimensions, croyait le P. Boscovich, parce que chacun d'eux est un être unique, un *minimum quid*, ne pouvant être divisé, au dire de Dalton, sans cesser d'être ce qu'il est. D'après des vues plus récentes et que l'on a des raisons de croire plus justifiées,

l'atome pourrait au contraire se dissocier en donnant des électrons, de masse beaucoup plus petite, toujours identiques, quel que soit le corps d'où ils proviennent, animés d'un mouvement périodique, et un ion central, qui ne serait lui-même pas simple, dont la composition et la construction caractériseraient la nature de la matière. Telle encore l'hypothèse de l'éther, élément fondamental de l'Univers, moins complexe peut-être dans sa réalité qu'on ne l'a cru, auquel on prête des propriétés conformes aux rôles qu'on lui attribue dans les phénomènes ondulatoires et rythmés de la chaleur, de la lumière et de l'électromagnétisme, et que l'on a même doté d'une activité particulière pour en faire l'agent efficace de la gravitation. Telle enfin l'hypothèse de l'élasticité, imaginée par Maxwell, pour que le diélectrique transmette ses courants de déplacement, base de sa théorie nouvelle de la lumière.

Ces genres d'hypothèses se rapportent aux causes spéciales de phénomènes déterminés, considérés isolément ; il en est d'autres qui s'appliquent aux relations existant entre diverses classes de phénomènes, dans lesquelles on a découvert ou cru découvrir une similitude évocatrice d'une certaine parenté. Le progrès et le développement des études expérimentales ont en effet conduit à généraliser un grand nombre d'aperçus, en se laissant guider par le sentiment d'une unité de plan dans la nature. Le mécanisme cartésien, en réduisant toutes les propriétés des corps à des combinaisons de figure et de mouvement, le dynamisme newtonien en y introduisant l'idée de force, l'atomisme en y ajoutant celle de masse, ont réussi à condenser un ensemble considérable de faits, d'en édifier une vaste synthèse et de prévoir nombre de phénomènes. C'est l'étude des trois lois de Képler qui a conduit Newton à les faire dériver d'une attraction mutuelle, qu'il a *supposée*

exercée par deux corps l'un sur l'autre, proportionnellement au produit de leurs masses respectives m et m' et en raison inverse du carré de leur distance r . Cette attraction hypothétique a été le point de départ des profonds calculs de la mécanique céleste, puis de la physique moléculaire, de la théorie de la capillarité, du potentiel newtonien, enfin du potentiel électrostatique, après que Coulomb eut formulé sa loi des attractions et des répulsions des quantités d'électricité. Laplace et Ampère ont édifié l'électromagnétisme et l'électrodynamique sur des formules élémentaires analogues à celles de Newton et de Coulomb, et l'on a identifié le champ magnétique produit par un courant fermé avec celui qu'engendre un feuillet magnétique de même contour (1) ; l'hypothèse des courants particuliers d'Ampère a enfin relié étroitement l'électricité et le magnétisme, et cette vue de l'esprit a trouvé son admirable couronnement dans l'aimantation par les courants et la création de l'électromagnétisme.

Souvent l'hypothèse s'inspire d'analogies établies entre des phénomènes étudiés dans tous leurs détails et d'autres que l'expérience ne nous permet pas de connaître directement, parce que leurs conséquences seules se trouvent dans le domaine accessible à nos sens. Ainsi en est-il de l'hypothèse de Bernoulli sur laquelle est fondée la théorie cinétique des gaz : une masse gazeuse est formée de molécules qui s'entre-choquent et heurtent les parois de l'enceinte qui les renferme ; on leur applique les lois du mouvement et du choc de mobiles élastiques. Van t'Hoff assimile un solide dissous dans un solvant liquide à un gaz, et il écrit une rela-

(1) Le problème de la distribution du magnétisme est inaccessible à l'expérience ; mais on a imaginé une constitution lamellaire des aimants qui sert de base à la théorie : on suppose qu'un aimant est formé de plaques infiniment minces dont les faces parallèles portent des couches uniformes, l'une de magnétisme nord, l'autre de magnétisme sud. Ce sont ces plaques que l'on désigne par le nom de feuillets magnétiques.

tion entre la pression osmotique, le volume et la température, fondement de la théorie des faits d'osmose, de diffusion et d'électrolyse. Arrhenius imagine une dissociation des sels électrolysables dans leurs dissolutions, pour rendre compte de la décomposition des ions, de leur conductibilité, de toutes les conditions d'équilibre des électrolytes et spécialement des phénomènes de neutralisation ; Nernst en déduit une explication ingénieuse du mécanisme de la production de la force électromotrice dans les piles.

Il est des savants qui ne se contentent pas de construire des hypothèses ; ils vont plus loin et se fabriquent des *modèles* des choses.

Chaque esprit a en effet sa tournure à lui et des besoins qui lui sont propres. En particulier, le savant anglais, dont les facultés imaginatives se complaisent dans le concret, a peu de goût pour les notions purement abstraites et il se sert de représentations matérielles pour donner de la vie à ses théories et se les figurer de la manière qui lui convient. C'est à lui que nous devons ce que nous venons d'appeler un modèle.

Les modèles sont empruntés à la pratique des ateliers et des usines ; ils font appel à leur technique. Le maître invente des mécaniques formées par l'agencement et la combinaison de plans et de cylindres, de cordes et de poulies, de roues dentées, de pignons et de crémaillères, de poids et de contrepoids, qu'il fait manœuvrer de manière à lui retracer le phénomène et à le lui faire comprendre. On a relevé et l'on cite souvent l'aveu de Lord Kelvin : « Je ne suis jamais satisfait tant que je ne peux pas construire un modèle mécanique d'un objet ; si je réussis à le faire, je comprends ; je ne comprends pas, tant que je ne me suis pas construit ce modèle » (1). Nous autres, formés à l'école de Laplace,

(1) W. Thomson, *Lectures sur la dynamique moléculaire*.

d'Ampère, de Fresnel, de Gauss, de Poisson, nous acquérons sans doute avec moins d'efforts la notion féconde du champ, de ses lignes, tubes et flux de force ; les disciples des Faraday, des Kelvin, des Maxwell, des Lodge, sentent plus que nous le besoin de matérialiser les actions exercées entre deux conducteurs électrisés, ou entre deux aimants, en imaginant entre eux des paquets de fils élastiques, implantés normalement aux surfaces ; en se raccourcissant, ceux-ci opèrent une tension, mais ils se gonflent, augmentent de section et développent entre eux une pression latérale. Attractions et répulsions se représentent de la sorte : le modèle est grossier ; mais c'est l'illustration d'une idée suivie, et celle-ci ressort mieux. En électrocinétique on emprunte, avec le même succès, l'image fournie par le transport de l'énergie mécanique au moyen de l'eau : l'hydraulique a ses lois qui expliquent le courant et son débit, ainsi que les résistances, et elle éclaire la notion de quantité, de tension, de capacité, d'énergie potentielle, etc. Nous nous servons tous de l'analogie que présentent ces phénomènes avec ceux de l'électricité, pour le plus grand profit du discours et pour une plus grande facilité des calculs ; le modèle est classique.

Le modèle est autre chose que l'hypothèse, celle-ci est d'un ordre plus élevé ; elle a une prétention de réalité et de vérité que ne possèdent pas les machines anglaises ; c'est le résultat d'une comparaison réfléchie, d'une généralisation rationnelle, en même temps que d'une imagination créatrice qui inspire confiance. Les figures prêtent à l'illusion d'être un décalque exact de l'objet naturel et l'on comprend que d'aucuns aient pu croire qu'elles nous font connaître le Monde.

Toutefois il en est d'autres qui sont restés sceptiques.

Nos modernisants-pragmatistes sont des gens avertis, qui ne se nourrissent plus d'illusions, et qui ne se laissent point prendre à l'appât d'idées brillantes, mais

fallacieuses; c'était vieux jeu de croire qu'on met la vérité à nu aussi aisément qu'on devêtit un homme. Écoutons-les dogmatiser au nom d'une critique infail-
lible.

Soit que les hypothèses s'appliquent à des éléments que l'on suppose être l'origine des phénomènes, soit qu'elles se rapportent aux lois de dépendance réciproque de ces phénomènes, qu'elles soient relatives à des causes ou à des effets, il n'est plus admissible de croire à leur réalité et de leur attribuer quelque objectivité.

Les réalités de la nature sont trop complexes pour se résoudre en de pareils assemblages de figures et de mouvements. C'est pur anthropomorphisme que de se figurer l'œuvre du Créateur d'après le modèle des œuvres de notre esprit, et de la voir comme elle serait, si nous l'eussions faite. Les théories sont impuissantes à nous donner la dernière raison des faits que l'expérience constate et contrôle superficiellement. D'ailleurs, aussitôt que la science, quittant le terrain solide de l'observation, se mêle d'interpréter les résultats, elle tombe dans des contradictions et des incohérences injustifiables. Dans ses plus admirables conceptions, Fresnel admet tantôt que la résistance de l'éther à la compression est nulle, tantôt qu'elle est infinie; c'est l'un ou l'autre : lequel ? Les modèles de Maxwell ne se correspondent pas toujours dans un même mémoire. N'est-ce pas une folie que de prétendre dès lors savoir comment les choses se passent derrière le rideau qui nous cache les changements survenus dans l'intime de la matière et de l'éther ? Nos sens et nos instruments ne nous rendent témoins que des effets sensibles, tangibles et palpables. Ne nous leurrions donc pas, de grâce, sur la portée et la profondeur de nos découvertes !

Après que Vaucanson eut mis la dernière main à son merveilleux canard, qu'il l'eut vu battre des ailes,

manger du grain, le digérer et marquer sa satisfaction en donnant du gosier, il eut le bon esprit de ne pas se vanter d'avoir infusé un souffle de vie à son automate. Les physiciens qui ont édifié des constructions symboliques, représentatives des agents de la nature, ne devraient pas être moins sages et moins réservés, et l'on voudrait qu'ils ne se donnassent pas le ridicule de faire attrouper les gens autour de leur œuvre en leur criant de venir tous voir comment est fabriqué l'Univers.

Il nous sied d'être plus modestes et de ne pas oublier ce que nous déclarait un des semeurs d'idées, qui aurait eu le plus de droit à s'illusionner, Claude Bernard : « Quand nous faisons une théorie générale, dans nos sciences, la seule chose dont nous soyons certains, c'est que toutes ces théories sont fausses, absolument parlant » (1).

La connaissance absolue nous échappe. Il n'y a pas identité nécessaire entre le réel et l'intelligible. Que pèsent les théories en tant que savoir ? Quelle est la valeur de savoir de la science ? Henri Poincaré nous l'a dit dans un admirable opuscule dont chaque page est un sujet de méditation (2).

Les savants n'ont point reçu pour mission d'expliquer la Nature et de découvrir le secret du Monde. Kirchhoff donnait comme règle de direction aux élèves de son laboratoire de s'occuper uniquement de la découverte, de la description et de l'étude des faits, en renonçant à toute « prétendue explication de la Nature » (3).

La science ne peut connaître que ce qui se trouve immédiatement à la portée de ses moyens d'investiga-

(1) Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris.

(2) Henri Poincaré, *La valeur de la science* (Paris, Flammarion).

(3) Kirchhoff, *Vortésungen über Mathematische Physik ; Mechanik*, p. 1.

tion ; elle ne conquiert que des faits ; elle constate que les choses sont telles, sans voir pourquoi elles sont ainsi et ne sont pas autrement. L'expérience, « source unique de la vérité », s'arrête aux causes prochaines, elle est impuissante à remonter plus haut ; on passe bien d'abord d'une cause à l'autre, mais on arrive bientôt à ce que Bacon appelait « une cause sourde »(1). C'est pourquoi Auguste Comte prescrivait de ne plus s'occuper des causes premières. Nos modernisants ont retenu son précepte et ils renoncent par principe à faire parler « les causes sourdes ».

Que les expérimentateurs collectionnent pour les théoriciens des faits et des lois ; voilà la matière sur laquelle ils travailleront. Ils les résumeront en un petit nombre de propositions, qui permettent à l'esprit de les voir d'ensemble, et ils les condenseront en quelques symboles faciles à retenir. C'est ce que Pierre Duhem nous a révélé avec sa netteté et sa franchise habituelles, dans une déclaration qui est certes dénuée de tout artifice : « La science théorique a pour but de soulager la mémoire et de l'aider à retenir plus aisément la multitude des lois expérimentales » (2). Le rôle des théories est tout utilitaire ; elles approvisionnent des recettes commodes, permettant d'agir avec succès sur le monde extérieur. Les plus belles théories physiques ne doivent plus être considérées que comme de simples instruments de classification ; ce sont des étagères. Leur valeur est méthodologique. Elles ne doivent tendre et ne peuvent servir à autre chose qu'à classer

(1) Claude Bernard, *La science expérimentale* (Paris, J. B. Baillière, 1878), p. 360.

(2) P. Duhem, *Réflexions au sujet des théories physiques* ; REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES, janvier, 1892, p. 140. *Physique et Métaphysique*, même Revue, juillet 1893. — *Sur la théorie physique, son objet et sa structure* (Paris, Chevalier et Rivière, 1906). Duhem est encore revenu sur ces questions dans un article de la REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES, 15 janvier 1908, intitulé *La valeur de la théorie physique*.

les documents, à nous les présenter dans l'ordre le plus avantageux, à les ranger judicieusement par séries, par catégories, comme dans un catalogue systématique : ce faisant, elles mémorisent la science du savant, de même que (*salva reverentia*) elles jalonnent les connaissances de l'élève en préparation d'examen et de concours ; ils les aident, l'un comme l'autre, à ne pas oublier, par une habile coordination des énoncés et des formules.

La valeur de la théorie est par conséquent une valeur de direction, qu'on doit apprécier dans la mesure où elle trace au chercheur une règle de conduite. Elle contribue au développement du savoir humain en lui évitant les faux-pas, les détours inutiles, les impasses sans issue. C'est beaucoup : mais ne lui demandez rien de plus, car elle ne saurait le donner. Pénétrez-vous de cette idée et faites-en votre profit ; elle vous gardera des trompeuses illusions que nous critiquons à bon droit dans l'histoire du passé.

Voilà la thèse qui cherche aujourd'hui à rallier les suffrages : je me suis efforcé de la présenter fidèlement et de donner à ses raisonnements la forme incisive et serrée, d'où ils tirent leur force et qui a le plus contribué à leur succès.

Nous avons dit que tout le monde ne refuse pas aux hypothèses et aux théories de la physique toute valeur objective.

Cette opinion compte encore des adhérents convaincus, voire même d'ardents apologistes, qui ne reculent pas devant la controverse, savent manier le syllogisme et trouvent le moyen de se faire écouter. Tous leurs arguments ne sont pas également décisifs, mais quelques-uns d'entre eux sont de nature à faire de l'impression sur les esprits libres de prévention et de tout parti pris.

Ils ont eu de l'écho et recueilli un assentiment raisonné de la part de penseurs restés jusque là étrangers à nos discussions scientifiques (1).

Un avocat des anciennes idées, et ce n'était certes pas un des moindres, après avoir pris connaissance de la déclaration de Duhem, que nous venons de rappeler, s'écriait dans un véhément article de réplique : « Tel est donc le but suprême du savant (de soulager sa mémoire et de l'aider à retenir plus aisément la multitude des lois expérimentales) : oui, vous, Galilée, vous, Newton, vous, Ampère, vous pensiez avoir soulevé un coin du voile qui nous cache les secrets de la nature ; vous croyiez avoir entrevu quelques aspects de l'éternelle beauté ! Illusion : vous n'avez dépensé vos veilles et consumé votre génie qu'à élaborer un procédé mnémotechnique ! (2) »

Cette virulente apostrophe, par laquelle le savant ingénieur du corps des mines de France et le non moins distingué professeur protestait contre une formule dont il dénonçait l'étroitesse puritaine et la désolante aridité, constituait un moyen de polémique plutôt qu'un argument irréfutable, mais elle exprimait une pensée qui était venue à l'esprit de beaucoup d'autres. Il ne peut être question d'organiser un plébiscite des grands créateurs de théories et de jeter leur opinion dans la balance de la discussion, mais on a le droit néanmoins d'en appeler à leur témoignage. Or, Képler, le grand Képler, qu'on a nommé le législa-

(1) M. Abel Rey a pris pour sujet d'une thèse de doctorat ès lettres, *La théorie de la Physique chez les physiciens contemporains* (Paris, Alcan, 1907) et il a exposé les idées dogmatistes avec talent ; le lecteur se reportera avec fruit à cette étude très documentée.

(2) Eugène Vicaire, *La valeur objective des hypothèses physiques* ; REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES, avril 1893, p. 451. Vicaire, qui avait occupé des chaires à l'École des Mines, au Collège de France et à l'Université catholique de Paris, a rempli pendant de longues années la plus haute fonction du corps français des Mines.

teur du ciel, avait certes conscience d'avoir fait plus que de fournir un adjuvant à la mémoire de ses contemporains, lorsqu'il leur disait que « connaître la vérité, c'est repenser les pensées du Créateur », et qu'il célébrait en ces termes émus la découverte de sa troisième loi : « Apprenez, ô mortels, que j'ai ravi les vases d'or des Égyptiens ; parvenu dans la terre promise, je les offrirai à mon Dieu, pour s'en faire un glorieux tabernacle ». Et encore : « Grâce à Vous, Maître des choses créées, pour le bonheur que Vous m'avez accordé ; j'ai enfin achevé ma tâche en y consacrant toutes les puissances de mon âme. Dans les limites de ma faiblesse, je me suis efforcé de manifester Votre gloire... J'ai proclamé devant les hommes toute la grandeur de la création et j'ai cherché à m'élever jusqu'à la vérité » (1).

Notre siècle frondeur et blasé peut sourire de ce lyrisme exubérant, mais il est bien obligé de reconnaître que, derrière ces mots enflammés, se cache une conviction profonde, que nous devons respecter sous peine de faire du grand astronome du XVII^e siècle un illuminé, si ce n'est un halluciné.

Tous les maîtres de la science avaient alors foi dans les œuvres de leur génie ; ils n'admettaient pas que leurs sublimes conceptions ne répondissent qu'à des apparences ; ils étaient convaincus qu'elles atteignaient les véritables causes et la raison même des choses. « *Vere scire, scire per causas* » avait dit Bacon ; Vicaire s'en est référé à Galilée, Newton et Ampère ; mais il était en droit d'évoquer l'opinion de Descartes, Huygens, Leibniz, celle même de l'encyclopédiste Diderot, celles encore de Fresnel, Linné, Biot, Cauchy, Dumas, Kelvin, Cornu, de Lapparent, etc. Descartes avait proclamé qu'il possédait une certitude morale

(1) Képler, *Harmonices mundi*, introduction au 5^e livre.

que toutes les choses de ce monde étaient telles qu'il les avait démontrées, et il ajoutait qu'il en avait une certitude « plus que morale » (1). Linné s'écriait : « Je vois Dieu » et il remerciait le Créateur de lui avoir permis « de jeter un coup d'œil dans sa chambre du conseil ».

Je ne multiplierai pas ces citations, mais voici un dernier trait, qui est significatif.

Sarrau se plaisait à raconter une anecdote qu'il tenait du P. Gratry, cet ancien polytechnicien devenu le pieux oratorien que l'on sait. Le religieux se promenait avec Cauchy dans les allées du jardin du Luxembourg et ils devisaient ensemble de la vie future et du bonheur qu'auront les élus à connaître enfin, sans restriction et sans voile, des vérités laborieusement poursuivies au cours de leur pèlerinage terrestre. Gratry dépeignait à son illustre interlocuteur la joie ineffable qu'il éprouverait à pénétrer le secret de la nature de la lumière, objet de ses recherches et de ses constantes méditations. Mais celui-ci de se récrier et de dire, avec animation, qu'il lui était impossible de rien apprendre de plus que ce qu'il savait actuellement (2), attendu que l'intelligence ne pouvait se représenter autrement le mécanisme de la lumière qu'il ne l'avait exposé (3). Le vertueux Cauchy n'était certes pas un orgueilleux ; c'était un convaincu. Un convaincu par illusion, dira-t-on : la preuve en est qu'il se trompait. Mais Hertz ne se trompait et ne s'illusionnait pas, quand il proclamait, au Congrès de Heidelberg, en 1889, que « humainement parlant, la théo-

(1) Descartes, *Principes de la philosophie*.

(2) L'expérience de Foucault venait de mettre hors de toute discussion la théorie des ondes lumineuses, en 1850.

(3) Ce récit a été recueilli de la bouche de M. Sarrau par B. Brunhes, qui le rapporte dans sa *Dégradation de l'Énergie*, p. 261 (Paris, Flammarion, 1909).

rie des ondes est certaine » ; ni M. Langevin, demandant qu'on fasse passer les atomes au rang des principes et concluant que « l'existence des ions dans les gaz a cessé d'être une hypothèse » (1) ; ni M. Jean Perrin, affirmant que la réalité moléculaire possède « autant de certitude qu'en peuvent avoir les principes de la thermodynamique » (2) ; ni Madame Curie, prononçant ces mots significatifs : « Nous avons admis que les rayons corpusculaires des substances radio-actives résultent de la fragmentation d'atomes ; c'est là, non plus une hypothèse, mais un fait expérimentalement établi » (3). Voilà des déclarations formelles émanées de savants contemporains, dont il serait permis de faire état sans plus discuter. Mais on pourrait nous reprocher de donner à quelques paroles isolées du contexte la portée d'une protestation qui n'était peut-être point dans la pensée des maîtres auxquels nous les empruntons. Nous y reviendrons.

Ne retenons pour le moment que les professions de foi des savants du temps passé, que nous avons le droit de considérer comme l'expression de leur conviction intime.

En rapprochant leur témoignage vibrant d'enthousiasme et d'émotion, animé d'une conviction profonde, des froides et réalistes déclarations pragmatistes, on sent l'opposition et le conflit de deux mentalités. L'une portée à la confiance, ne se méfiant pas assez de l'illusion ; son antagoniste, défiante d'elle-même et de ses moyens d'action, mais sacrifiant à une critique sévère,

(1) Conférence faite à la Société Internationale des Électriciens, le 4 novembre 1905.

(2) Conférence faite en 1912, à la Société de Physique : *Les preuves de la réalité moléculaire* ; publiée dans les *Idées modernes sur la constitution de la matière* (Paris, Gauthier-Villars, 1913), p. 52.

(3) Même recueil ; conférence *Sur les rayonnements des corps radio-actifs*, p. 275.

quelquefois outrée, et ne se montrant catégorique que dans ses négations.

On serait disposé à dire que ce sont deux cultes de la science ; pas n'est besoin d'un grand effort d'imagination pour se représenter leurs chapelles.

Après avoir mis en présence les formules dans lesquelles s'incarnaient les deux idées et les dogmes qui en sont l'expression, il ne sera pas sans profit pour notre étude de nous rendre compte de la manière dont les deux églises se sont fondées. Nous ferons argumenter ensuite contradictoirement entre eux leurs fidèles.

L'homme ne se résigne pas aisément à avouer son impuissance ; il est au contraire enclin à s'exagérer la portée de son action.

Imbus de la conception de l'harmonie de l'Univers, les physiciens d'autrefois ne croyaient pas pécher par présomption en se proposant d'expliquer le Monde ; d'autre part, exaltés par les succès obtenus, ils pensaient qu'à force d'interroger la Nature, ils arriveraient à lui ravir ses secrets. Un horloger, entendu dans son métier, est autorisé à espérer qu'il lui sera possible de comprendre n'importe quel chronomètre, s'il lui est donné d'en ouvrir le boîtier, d'en examiner et d'en démonter les rouages.

On était d'autant plus porté aux grands espoirs que l'on croyait davantage à la simplicité des lois de la création et à leur généralité. « Il suffit que Gay-Lussac touche à un sujet pour trouver une loi », s'écriait non sans quelque jalousie Dulong en 1825 (1). C'était l'époque où ces Messieurs du Muséum n'allaient pas déjeuner avant d'avoir découvert quelque chose dans leur matinée.

Mais, plus la science progressait, plus grande appa-

(1) De la Rive, *Notice sur M. Verdet* ; préface aux Notes et mémoires de Verdet (Paris, Imprimerie nationale, 1872) ; p. 35.

raissait la complexité des phénomènes ; à mesure que les regards y plongeaient plus profondément, l'obscurité devenait plus épaisse, et un jour vint où l'on se prit à désespérer de jamais y voir clair. La loi de Gay-Lussac n'était qu'une première approximation ; comme celle-là, la loi de Mariotte ne convenait qu'au seul cas d'un gaz parfait ; or, c'est un cas limité, un cas fictif ; pour les gaz réels, il faut recourir aux formules de Regnault, de Cailletet, de Van der Waals, de Sarrau, d'Amagat, etc., qui ne sont encore pas rigoureuses et ne tolèrent aucune extrapolation. Les dilatations, les tensions des vapeurs saturées, la dispersion de la lumière et le pouvoir réfringent des gaz ne répondaient plus aux considérations élémentaires des premiers jours. Les équations linéaires ne donnaient que des résultats moyens ; en chaleur et en électricité, l'emploi des fonctions harmoniques de la mécanique céleste s'imposait, et M. Émile Picard annonçait qu'on serait amené à employer, pour la représentation exacte d'un grand nombre de phénomènes, d'autres fonctions que les fonctions analytiques (1).

Les débris des lois corrigées ou condamnées et des théories abandonnées sans retour couvraient le sol, et quelqu'un osa écrire que la physique était devenue un « cimetière d'hypothèses » ; il sacrifiait la vérité au plaisir de placer un mot. Toutefois, on ne saurait nier que bon nombre d'hypothèses étaient infirmées par les plus récentes observations, devenues plus précises, et qu'on se voyait réduit à les abandonner, ou bien à les modifier et à les compléter, ou encore à les multiplier à l'excès.

Une réaction se produisit : elle fut trop vive.

(1) E. Picard, *Rapport sur les sciences*, publié à l'occasion de l'Exposition Universelle de Paris de 1900.

On aurait dû redoubler de circonspection et se garder de conclusions hâtives ; au lieu de cela, on vint à se dire que les plus séduisantes hypothèses et les théories les plus accréditées conduisaient à plus d'erreurs que de découvertes ; de cette suite de déceptions naquirent le découragement et le scepticisme.

Il parut alors aux physiciens qu'ils se trouvaient dans la condition de l'horloger qui ne parviendra jamais à ouvrir le boîtier du chronomètre ; ils se sont contentés par suite d'observer la marche de ses aiguilles et de chercher la loi de leur déplacement sur le cadran en fonction du temps. Et ils se sont pris à douter systématiquement de leur belle science.

Renonçant donc à découvrir le *pourquoi*, ils se sont consacrés avec d'autant plus d'ardeur à la seule recherche du *comment* ; ils ont défini la théorie physique dans les termes qui suivent : « C'est un système de propositions mathématiques, déduites d'un petit nombre de principes, qui ont pour but de représenter aussi simplement, aussi complètement et aussi exactement que possible, un ensemble de lois expérimentales » (1).

Ils se sont donné pour objectif, non pas d'expliquer la Nature, mais de l'étudier dans ses œuvres ; de connaître les choses uniquement par leurs effets et nullement par leurs causes présumées. C'est ainsi qu'ils sont devenus les pragmatismes que nous savons.

Par définition, ont-ils dit, la physique est la science qui s'arrête aux causes prochaines des phénomènes.

Chercher à remonter à l'origine et à la raison des choses, et à interpréter la création, ce n'est plus de la physique.

C'est de la métaphysique.

Et tout le débat entre les deux écoles s'est trouvé

(1) Duhem, LOC. CIT., *La Théorie physique*, p. 26.

circonscrit, à un moment donné, dans ce peu de mots : l'une fait de la métaphysique, l'autre se refuse à en faire (1).

Cette formule brève et incisive paraissait résumer tout le différend, mais elle n'en donnait pas la solution.

Un examen approfondi va nous montrer qu'elle énonçait une phobie, rien de plus, une phobie peu raisonnée, qui portait plus sur les mots que sur les choses.

Pourquoi donc, demandait-on à ces physiciens scrupuleux, pourquoi ne voulez-vous pas faire de la métaphysique ? Vous détournez vos lèvres de la coupe que l'on vous présente, comme si elle était empoisonnée. A quel sentiment obéissez-vous, un sentiment de dédain ou d'animadversion ? Les deux seraient injustifiés. Il faudrait que le concours des deux pensées devînt pernicieux pour le travail d'investigation : or, c'est le contraire qui est vrai.

Toutes les sciences peuvent se prêter un mutuel appui et elles se le doivent ; en particulier, deux sciences, qui ont des objets communs, marcheront à la conquête de la vérité comme deux alliées, et elles remporteront des victoires auxquelles elles n'auraient pu prétendre en agissant isolément. Les physiciens et les chimistes se sont bien trouvés de la création de l'édifice, élevé par Henri Sainte Claire Deville et Berthelot, sur leur frontière commune, et la Chimie physique a pris en ces derniers temps une importance inespérée. Il y aurait un égal profit à fonder une Physique-Métaphysique ; la distance est plus grande de la Chimie à la Physique que de la Physique à la Métaphysique.

Ces deux domaines du savoir sont en effet contigus et M. Boutroux a même déclaré qu'il n'y a point de fossé entre eux : « La science est une des branches des con-

(1) Rnhem, LOC. CIT., *Physique et Métaphysique*, passim.

naissances humaines, la philosophie en est une autre, et elles ont un égal besoin l'une de l'autre » (1). Nous ne saurions trouver témoignage mieux autorisé et plus nettement exprimé.

Mais nous irons plus loin encore : les deux ordres d'étude appartiennent, comme on l'a dit, « au même monde », ce qui veut dire qu'elles sont l'œuvre d'un même sujet commun, notre esprit. Cette proposition n'est point paradoxale, il nous sera facile de le faire voir : en effet, la métaphysique, quel que soit le sens qu'on attache à ce mot, est la suite de la physique, son prolongement, sans hiatus, son couronnement.

L'expérimentateur a débuté par disséquer les éléments qu'il a recueillis, en isolant les faits ; il a classé objectivement ses acquisitions, ainsi qu'il a été dit ci-dessus, découvert entre elles des liens de parenté, transformé ces liens en lois et groupé finalement ces lois pour en construire une théorie : la systématisation des phénomènes et la réduction des lois particulières aux lois générales sont un résultat d'analyse et de synthèse. L'idée de la série, de l'ordre, de la succession, de l'unité, de la constance, de la causalité est le principe directeur qui conduit du fait à son origine, de l'expérience à la spéculation, de la science à la philosophie, qui la prolonge et la complète.

Cette manière de voir était celle des premiers physiciens, dignes de ce nom ; sans vouloir remonter plus haut, rappelons qu'en 1629, un Jésuite, le P. Nicolas Cabeo, avait publié une *Philosophia magnetica* ; vers le même temps, Descartes disait que la philosophie est

(1) Cf. : *M. Émile Boutroux* par G. Fonsegrive ; dans le CORRESPONDANT du 10 janvier 1914.

(2) Le titre de *métaphysique* a été inscrit en tête des livres d'Aristote qui viennent après ses traités de physique, τὰ μετὰ τὰ φυσικά ; quelques-uns pensent que ces mots indiquent une suite. D'autres estiment qu'ils veulent dire *ce qui est par delà la physique* et s'appliquent à la science des principes et de ce qui est au-dessus des sens.

une « réflexion sur la science » et il écrivait à Beeckmann, à propos d'une expérience, que, s'il lui était prouvé qu'elle fût fautive, il avouerait « ne rien savoir en philosophie » (1); Newton traçait les règles du travail scientifique et il caractérisait la méthode par le titre significatif de *Regulæ philosophandi* (2); le physicien philosophait donc, et, de fait, on ne saurait dénommer autrement son œuvre, dans laquelle Leibniz voyait une fusion de la mathématique dans la métaphysique. Les Anglais ont retenu l'identification en conservant dans leurs Universités les chaires de « Natural Philosophy » (3). En 1739, Boscovich faisait paraître sa *Theoria philosophice naturalis*; l'appellation est restée dans toutes les langues et elle est venue jusqu'à nous.

Dans son remarquable travail, dont le titre consacre l'existence d'une frontière commune entre la science et la philosophie (4), le P. Carbonnelle a montré ces deux disciplines « rapprochées jusqu'au contact » et « mêlées nécessairement »; « le savant, dit-il, tout en restant sur son propre domaine, est arrivé à ces sommets, d'où l'œil pénètre au loin dans le domaine limitrophe de la philosophie ». M. Boutroux, que nous citerons de nouveau, a écrit excellemment : « dans les sciences mêmes, il y a, en réalité, pour qui approfondit leurs conditions d'existence, des postulats d'un caractère métaphysique..., ils consistent à admettre que tous les phénomènes de la nature sont soumis à ce qu'on appelle des lois naturelles » (5). Joseph Bertrand estimait

(1) Duhem a extrait ces mots d'une lettre de 1634, donnée dans la *Correspondance de Descartes* de Tannery et Adam; voir Duhem, *La théorie physique*, p. 49.

(2) Newton, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*; 3^e pars.

(3) Lord Kelvin a occupé cette chaire à l'Université de Glasgow, de 1846 à 1899.

(4) Carbonnelle, *Les confins de la science et de la philosophie* (Paris, Victor Palmé, en 2 volumes, 1881); passim.

(5) Boutroux, *Morale et religion*. REVUE DES DEUX MONDES, septembre 1919, p. 20.

que Robert Mayer était plus philosophe que physicien, lorsqu'il posait le principe de l'équivalence du travail et de la chaleur (1). Le fait d'expérience dont il partait était la différence des chaleurs spécifiques des gaz ; mais il avait d'abord rappelé que la force, immuable en sa grandeur, change incessamment de forme, et que toujours l'effet remplace la cause (*causa æquat effectum*) ; il invoquait le principe métaphysique de causalité. Helmholtz fut amené à son célèbre mémoire de 1847, sur la *Conservation de la force* (lisez de l'Énergie) par la recherche de la part que peuvent prendre les forces vitales dans les phénomènes de la nature ; ces forces ne pourraient-elles pas rendre le mouvement perpétuel possible ? Cette belle étude est donc née du conflit d'une idée philosophique avec un principe de mécanique rationnelle et elle en appelait à la formule célèbre *Ex nihilo nihil in nihilum posse reverti* (2). M. Émile Picard déclarait plus récemment (3) que « la science physique se présente à nous comme une vue du monde extérieur, à travers des concepts tirés par abstraction de l'expérience » ; il ajoutait que « la mathématique est une pièce essentielle dans l'édification de la philosophie naturelle ».

Je ne multiplierai pas ces citations, empruntées à l'histoire des sciences et aux témoignages de nos contemporains. Il est établi que tout physicien, en subordonnant entre eux les phénomènes, cherche à y découvrir la suite des causes et des effets. Conformément à une fine remarque, qui me servira de conclusion, « jamais la philosophie ne doit abandonner le physicien, non pas qu'elle lui révèle *a priori* le but qu'il doit

(1) J. Bertrand, *Thermodynamique*, p. 63.

(2) Helmholtz, *Die Erhaltung der Kraft* ; 1847.

(3) E. Picard, *La mathématique dans ses rapports avec la physique*. REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES, 15 août 1908, p. 608.

atteindre, mais c'est elle qui le dirige et le guide sans cesse » (1).

Voilà donc que nous prenons en constant et flagrant délit de métaphysique ceux qui se défendaient si bien d'en faire ; ils en font, sans le vouloir, malgré eux, quelques-uns peut-être sans le savoir, ce qui est le plus piquant de la chose. N'insistons pas ; nous aurions mauvaise grâce.

À l'ordinaire, c'est après que le physicien croit avoir dit son dernier mot que se fait entendre le penseur de profession, le philosophe de la Nature, le métaphysicien anonyme et quelquefois inconscient qui est en lui. La physique peut être considérée comme une grande hypothèse à vérifier ; le philosophe a concouru à son établissement par des données qui ne sont pas d'expérience, mais de raisonnement. Il faut savoir trouver ce qui se cache derrière chaque loi et chaque hypothèse coordinatrice et pénétrer profondément au sein de ces matériaux ; c'est lui qui, en méditant sur les lois et les théories, fondées sur des faits habilement assemblés et logiquement comparés, les rapproche de nouveau des faits d'où on les a sorties et remonte à leur origine, c'est-à-dire à leur cause, par intuition (2) et par abstraction ; cette étude lui fournit souvent des vues plus générales sur l'essence des choses et sur les substances considérées en elles-mêmes.

En somme, physiciens et métaphysiciens traitent la même matière, mais en la prenant par des bouts opposés et en procédant à l'envi par analyse et par synthèse.

Tous deux développent une idée, suivant l'observation profonde de Claude Bernard : « c'est l'idée qui constitue le point de départ, ou le *primum movens* de

(1) J. de Joannis, *Les hypothèses physiques au point de vue philosophique*. ÉTUDES, juin 1890 ; p. 221.

(2) Le mot *intuition* (*in tueri*, regarder à l'intérieur, au fond) dit bien l'opération que nous venons de décrire.

tout raisonnement scientifique, et c'est elle qui est également le but dans l'aspiration de l'homme vers l'inconnu » (1). L'expérience est pour les deux l'autorité suprême ; pour tous deux aussi les lumières de l'esprit illuminent les faits : l'idée, le but des deux est de connaître. Le second retravaille les matériaux déjà élaborés par le premier ; il les remanie en se plaçant à un point de vue supérieur ; pour lui, il y a plus de recul, il peut apprécier plus justement. A tout prendre, ils collaborent à une même tâche et se servent l'un de l'autre.

Nous avons donc raison de dire qu'elle est artificielle cette barrière, cette cloison étanche, qu'on voudrait élever entre la Physique et la Métaphysique, car on serait bien en peine de dire où finit celle-ci et où commence celle-là. Le physicien qui éconduit dédaigneusement ceux qui l'interrogent sur l'essence des choses, en leur déclarant qu'ils se trompent de porte et les prie de s'adresser à la maison d'en face, où l'on en sait peut-être davantage, ne devrait plus en imposer à personne : physiciens et métaphysiciens habitent la même maison, mais à des étages différents.

Discussions de mots, nous diront quelques-uns ; revenez donc au point essentiel, auquel se réduit, à dire vrai, toute cette querelle des savants anciens et modernes, des dogmatistes et des pragmatistes. « Nous est-il possible, oui ou non, de connaître quelque chose de la nature des éléments et de remonter au delà des causes secondes » ?

Recontons les arguments des deux parties.

Eugène Vicaire pose nettement la question : pouvons-nous, dit-il dans le travail cité plus haut, non pas certes pénétrer tous les secrets de la Nature, mais en

(1) Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, p. 47.

pénétrer quelques-uns ? Pouvons-nous acquérir de celle-ci une connaissance, non pas adéquate et complète, mais réelle tout de même, et nous en former une représentation qui soit vraiment l'image de ce qui existe ? — Il répond d'abord timidement : « Dès que l'on admet l'existence de la matière, la réalité de nos perceptions et leur vérité, c'est-à-dire leur conformité avec la cause qui les produit, il semble difficile d'assigner une limite quelconque aux connaissances que nous pouvons acquérir sur les phénomènes naturels et sur la structure intime de la matière qui en est le siège ». Mais il s'enhardit bientôt et il écrit ces mots décisifs : « Il n'y a aucune limite où l'on puisse me dire : au nom de la science, tu n'iras pas plus loin » (1).

L'affirmation est péremptoire dans sa concision ; l'argument sur lequel elle s'appuie gagnerait toutefois à être développé.

L'expérience nous met chaque jour en possession de faits nouveaux. En multipliant les questions posées à la Nature, en les variant de toute façon, en les combinant entre elles avec la perspicacité tenace et insidieuse d'un juge d'instruction, le physicien lui fait avouer un à un ses secrets. Le perfectionnement incessant des méthodes dont il fait emploi et des instruments dont il dispose, augmente incessamment la puissance de ses moyens d'investigation ; sans croire au progrès indéfini, on a le droit d'escompter un immense développement de nos connaissances en surface et en profondeur : nul ne saurait dire où et quand s'arrêtera ce développement.

On sera conduit certainement à une vision toujours plus claire, plus pénétrante, plus largement compréhensive des propriétés qu'il faut attribuer aux sub-

(1) *Loc. cit.*, p. 464, Vicaire ne démontre pas la proposition, il l'éclaire par de judicieuses comparaisons, empruntées à la théorie atomistique, qui est pour lui plus qu'un symbole ; il espère que l'on découvrira un jour « le microscope qui dissipera les dernières hésitations ».



stances agissantes pour qu'elles puissent produire les phénomènes observés. Ces jugements ne seront pas entièrement conventionnels et arbitraires, s'ils reposent sur la base solide d'observations consciencieuses, de comparaisons justifiées et de déductions logiques. Il est vrai que chacun de nous donne, au gré de son imagination, une figure spéciale à ses concepts et un corps à ses abstractions et qu'il force quelquefois les faits « à se contorsionner » pour qu'ils prennent la forme souhaitée. Mais les artistes que sont nos physiiciens travailleront d'après nature, en s'efforçant d'obtenir la plus grande ressemblance entre ce qui est réellement et ce qu'ils s'imaginent, entre l'œuvre de Dieu et celle de leur esprit. Il y a évidemment, dans la première, des traits qui ne peuvent être rendus avec une complète vérité, des détails qui échappent au crayon, des couleurs dont leur palette ne donne pas l'équivalent ; mais pourquoi leur ébauche n'en fournirait-elle pas quelques éléments plus saisissables que les autres et plus caractéristiques ? L'Univers, en tant qu'il est objet de science, présente des parties intelligibles à notre raison : « les machines de la Nature sont machines partout, quelque partie qu'on en prenne », écrivait le grand Leibniz à Bossuet ; elles présentent avec nos machines certaines conformités, que nous saisirons à la longue, en réduisant ces mécaniques à leurs rouages essentiels. On répète trop souvent que « nous ne saurons jamais le dernier mot de rien » : quel est donc l'oracle qui a prononcé ce verdict d'impuissance ? « L'homme peut plus qu'il ne sait », a dit Claude Bernard. La conception agnostique, d'après laquelle l'homme serait condamné à une ignorance complète des causes profondes des phénomènes, n'est pas un dogme indiscutable de la foi scientifique. On a pu dire avec hauteur et avec une assurance imperturbable, qui en a imposé aux masses, mais personne n'a

établi, qu'il existe un domaine clos, qui restera éternellement fermé pour nous ; on a affirmé, mais personne n'a démontré, que telle ou telle partie des investigations scientifiques ne sera jamais ouverte à notre action, malgré tous les progrès de la technique et en dépit de tous nos efforts.

Cette dernière assertion occupe une si large place dans la thèse pragmatiste, que force est de nous y arrêter plus longuement que nous ne l'aurions voulu.

On argue donc d'une région réservée, inaccessible aussi bien aux expériences qu'aux spéculations et aux théories des physiciens.

Mais où est-elle cette barrière infranchissable, et quelle preuve nous donne-t-on de son existence ?

C'est, dit-on, la région des causes premières.

Eh bien, il faudrait d'abord tâcher de s'entendre sur ce qu'on appelle des causes premières. Ce sont par définition des causes qui ne sont médiatisées par aucune autre, des causes irréductibles. Elles constitueraient le premier anneau de la chaîne des causes ; il faudrait admettre que nous ne pouvons toucher que les anneaux qui viennent à leur suite, attendu que ce sont les causes secondes qui seules se manifestent à nous. Or, voilà encore un jugement qui prête à controverse. Newton a découvert que tout se passe dans le monde de la matière comme si les corps s'y attiraient à distance, avec une force proportionnelle au produit des masses en présence et en raison inverse du carré de la longueur r qui sépare leurs centres de gravité. Ce grand esprit s'est demandé aussitôt comment cette force s'exerçait d'une masse à l'autre à travers l'espace, et pourquoi elle s'exerçait ainsi, en raison inverse du carré, et non pas du cube ou d'une autre puissance de r ; mais il n'a point persévéré dans cette recherche et c'est dans ce sens qu'il faut entendre son fameux *hypo-*

theses non fingo. Les modernisants nous proposent pour modèle cette prudente réserve, ce qui n'empêche pas de nombreux et savants physiciens de chercher encore aujourd'hui à éclaircir cette énigme. Deux solutions du problème se sont présentées à eux. Les forces centrales peuvent être une propriété essentielle des éléments matériels, inséparable de leur substance, constituant une de leurs facultés actives ; le phénomène aurait pour cause son agent lui-même ; c'est ce qu'ont admis les tenants de l'action à distance, le P. Boscovich, Cauchy, de Saint-Venant, et d'autres (1). L'école de Faraday a fait au contraire du milieu interposé le siège de la production et de la transmission des forces ; pour elle, le phénomène est composé, il est la résultante d'autres, notamment de mouvements et de chocs, dont les lois sont inconnues ; avant Faraday, Lesage avait déjà émis d'ingénieuses idées sur le sujet ; elles ont été reprises, rajeunies et présentées sous une forme meilleure par le P. Leray, Lorentz, Langevin, etc. La gravitation serait dès lors attribuée à une cause seconde, tandis que pour Boscovich c'était l'effet immédiat d'une cause première. Les deux thèses ont été logiquement soutenues ; la seconde semble prévaloir, et pourtant il serait téméraire de prendre définitivement parti pour l'une contre l'autre, aussi longtemps qu'un argument plus péremptoire n'aura pas été produit.

Les phénomènes de l'affinité nous apportent une preuve non moins significative de l'incertitude qui règne sur l'ordre des causes. Les chimistes ignorent encore pourquoi deux grammes d'hydrogène se combinent avec seize d'oxygène, et non pas avec quinze ou dix-sept ; ils ne l'ignoreront pas toujours, s'ils

(1) Carbonnelle, *op. cit.*, p. 165 et suivantes : le savant Jésuite se rangeait délibérément aux côtés de son illustre confrère le P. Boscovich et de son ami de Saint-Venant : c'était en 1881.

arrivent à connaître la forme et le mode de groupement atomique des deux éléments. Le sauront-ils jamais ? Pourquoi pas ? L'électricité ne joue-t-elle pas un rôle dans cette combinaison ?

Retenons de tout cela que l'anneau initial des chaînes n'est pas fatalement et toujours hors de notre portée, ou tout au moins que ce n'est pas démontré.

Mais alors, que reste-t-il de l'argument de la région réservée, et des causes premières inaccessibles ?

Faut-il suivre ces causes ou non ?

Pourquoi ne les suivrait-on pas ? Dans le doute, quelques-uns s'abstiennent ; *in dubio abstinere*, dit le proverbe ; le conseil est sage, en général : mais il ne convient pas à tous et il serait regrettable qu'il fût entendu des pionniers de la science. Le doute n'est pas effectif, il est stérile ; il conduit à l'abstention, qui est inopérante. Si les explorateurs du xv^e siècle n'avaient pris la mer qu'après avoir acquis des certitudes sur l'au-delà de l'Océan, nous ignorerions peut-être le Nouveau-Monde ; ce sont des aventuriers, partis à la recherche de trésors chimériques, qui ont trouvé des pépites d'or et découvert l'Eldorado. Les prospecteurs des champs de l'inconnu quittent le grand chemin et se lancent dans les sentiers moins frayés : si Fresnel en avait cru le génie de Laplace, il n'eût pas cherché à expliquer la double réfraction par les ondulations du fluide éthéré (1). Ceux qui réussissent le mieux ne sont pas de froids et égoïstes calculateurs, ménagers de leurs peines et de leurs efforts, ne procédant qu'à pas comptés et à coup sûr. Les savants doivent chercher à

(1) Dans son *Exposition du système du monde*, Laplace avait écrit que la « propriété singulière d'un rayon polarisé par un cristal parallèle au premier indique évidemment des actions différentes d'un même cristal sur les diverses faces d'une molécule de lumière ». Les mots soulignés le sont par nous.

remonter aux causes, au risque de n'y pas arriver : s'ils ne savent à l'avance quelles sont celles qu'ils pourront saisir, ils les poursuivront donc toutes ; dans cette chasse aux causes, il en est qui se laisseront prendre tôt ou tard ; la chasse sera plus ou moins fructueuse, mais ils commettraient une faute en ne s'y livrant pas. Cette faute, la thèse moderne la ferait commettre, si elle interdisait de remonter des effets aux causes, le plus avant qu'il se peut.

On ampute la physique d'un bras, disons mieux, on lui coupe les ailes et on la prive de tout essor, en l'asservissant trop servilement à la raison pure, en la liant étroitement au document expérimental, en n'offrant en pâture à son insatiable curiosité que des équations différentielles, en abaissant ses maîtres au rang de collectionneurs de formules commodes, en se privant d'images représentatives des choses, en condamnant toute intervention de l'imagination.

L'imagination ! Goethe en faisait « l'avant-coureur de la raison » ; à ce titre, elle est un précieux auxiliaire de la science. Elle donne de l'envergure aux conceptions du créateur de théories, en lui faisant découvrir des rapports imprévus entre des résultats acquis par l'expérience, et en lui suggérant les généralisations qui conduisent les doctrines vers « l'unité et la simplicité » que H. Poincaré rêvait pour elles (1). Claude Bernard engageait, il est vrai, ses élèves à accrocher leur imagination au vestiaire, avant d'entrer au laboratoire, mais il ne leur défendait pas de la reprendre en sortant et de s'en servir pour raisonner sur les résultats d'expérience qu'ils venaient de recueillir ; l'esprit de l'escalier est le fruit d'une méditation poursuivie après qu'on a tiré la porte sur soi. Fontenelle avait dit depuis longtemps, en son style acadé-

(1) H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*, p. 202.

mique, que « lorsque la raison s'arrête effrayée au bord des abîmes de l'inconnu, l'imagination continue de marcher ; et elle fait marcher ! » (1), ajoutait-il avec conviction. Oui, elle fait marcher : elle aiguillonne le chercheur, lui donne de l'entrain et soutient sa confiance. Il faut avoir de l'allant pour progresser dans les chemins escarpés de la science ; les ascensionnistes des Alpes prennent un guide et se font accompagner de porteurs ; on chante pour tromper la fatigue. Pourvu que la faculté imaginative reste subordonnée à la déductive, et que le bon sens domine les écarts de celle qu'on a sévèrement appelée la folle du logis et qui en est quelquefois la bonne fée, celle-ci doit prendre place à la table du conseil et, s'il n'est pas indiqué de lui accorder voix délibérative dans les graves décisions à prendre, elle doit toujours avoir voix consultative.

Au sentiment de Duhem, que « la théorie n'est pas destinée à nous faire découvrir de nouvelles lois » (2), opposons donc celui plus juste et plus pratique de Poincaré, que « mieux vaut prévoir sans certitude que de ne pas prévoir du tout » (3). En effet, pourvu que l'on procède avec méthode et circonspection, la probabilité que l'on a d'atteindre le vrai peut être mise en parallèle avec le risque encouru de faire fausse route ; d'autre part, on ne s'expose pas à laisser échapper les occasions, qui pour l'ordinaire ne se présentent pas deux fois dans la carrière d'un chercheur ; somme toute, on multipliera les chances de réussite en prenant le plus de billets que l'on peut à cette loterie qu'est la recherche expérimentale et spéculative des vérités naturelles.

(1) Cfr. *Fontenelle*, par E. Faguet. REVUE DES DEUX-MONDES, avril, 1909.

(2) *Loc. cit.*, p. 175.

(3) H. Poincaré, *Relations entre la physique expérimentale et mathématique* ; Rapports présentés au Congrès de Physique de l'Exposition de 1900 ; t. I, p. 4.

Les châteaux en Espagne sont des châteaux comme les nôtres : Vicaire a rappelé avec à-propos que « une hypothèse est une proposition à vérifier, et qu'entre un fait et une hypothèse il n'y a qu'une différence de certitude et non pas de nature ». On conclura de cette juste remarque qu'entre la réalité, quelle qu'elle soit, et les hypothèses aussi ingénieuses que variées que les explicationnistes ne se laisseront pas d'inventer, il se produira, en certains points et à certains jours, des rencontres heureuses. Ces rencontres entre la réalité et la supposition rendue plus plausible par élimination et sélection deviendront de plus en plus fréquentes.

Que d'hypothèses déjà vérifiées et devenues des faits !

Copernic proposait sa théorie héliocentrique comme une hypothèse, en faveur de laquelle il ne revendiquait d'autre avantage (il l'a dit expressément) que de donner lieu à des calculs conformes aux observations : est-il aujourd'hui vérité mieux établie que la rotation de la Terre et des planètes autour du Soleil ? Le génie de Newton avait découvert que, si les masses matérielles s'attiraient suivant une loi déterminée, les lois de Kepler devenaient nécessaires ; ce n'était qu'une supposition, une hypothèse, mais toute la mécanique céleste est venue témoigner en sa faveur et les expériences de Cavendish l'ont confirmée directement. C'était aussi une supposition que celle de l'aplatissement du sphéroïde terrestre aux pôles ; Newton y croyait, Cassini la niait ; les mesures d'arc de méridien au Pérou et en Laponie ont fait constater une réduction d'un 306^{me} sur la longueur du rayon polaire. Lowthian Green avait déduit de l'observation des déformations d'une sphère, comprimée par l'extérieur, sa théorie tétraédrique du globe, et il annonçait l'existence au pôle Sud d'un continent, et au pôle Nord d'une mer, profonde d'au moins 3500 mètres ; les explorateurs ont constaté l'existence de la terre ferme prévue

par le théoricien et la sonde de Peary est descendue à 3500 mètres dans l'eau liquide recouverte par la banquise arctique, avant de toucher le fond. La théorie suggère à Ampère l'hypothèse des courants particuliers des aimants, et lui fait prévoir l'aimantation du fer doux par un courant, ce dont Arago constate la réalité. Hamilton devine les deux espèces de réfraction conique que Lloyd recherche et découvre. Maxwell fait de l'onde lumineuse une suite de courants alternatifs fermés qui se produisent dans le diélectrique, dans l'air et dans le vide ; l'induction électrique due à ces alternances se propage, dit-il, avec la vitesse de la lumière ; Hertz le constate en 1888. Maxwell encore annonce que la lumière exerce une pression sur les surfaces qu'elle illumine ; Lebedew et, plus récemment, MM. Huls et Nichols mesurent cette pression et sont conduits à des vérifications numériques entièrement d'accord avec les prévisions du calcul.

J'arrête là ce bilan des vérifications des hypothèses, en laissant au lecteur le plaisir de le compléter ; mais j'en ai dit assez pour démontrer ce qu'il fallait, à savoir qu'un bon nombre d'entre elles sont identifiées avec des phénomènes que nous voyons de nos yeux, entendons de nos oreilles et touchons de nos doigts. Il en est de même de théories, essentiellement spéculatives de leur nature, qui sont irrévocablement mises à l'abri du doute, parce que leurs conclusions sont établies par des constatations expérimentales que l'on ne discute plus, et par des raisonnements à propos desquels on n'ergote plus. Tel est le concept des radiations calorifiques, lumineuses et actiniques, qui s'étalent côte à côte dans le spectre et révèlent, par l'identité de leurs propriétés, une identité d'espèce indéniable : il est établi pour tous aujourd'hui que ce sont des manières d'être rythmées, des modes périodiques des corps ; je ne dis pas des modes de mouvement, car nul n'oserait l'affirmer ;

mais nous savons de connaissance certaine que ce sont « des vecteurs transversaux, périodiquement variables dans l'espace, à chaque instant, le long d'un rayon, et dans le temps, en un même point au cours du temps... Le contenu de cette formule est définitivement acquis » (1), aussi définitivement que le contenu du beau chapitre de la physique consacré à l'acoustique, dont toutes les hypothèses sont aujourd'hui des faits.

Et au-dessus de ces théories planent des doctrines plus larges et plus hautes, non moins sûres ; tel est ce principe grandiose de l'unité des forces physiques, qui groupe les phénomènes les plus divers dans un ensemble majestueux et en définit avec une précision mathématique la dépendance réciproque, en déterminant l'équivalent mécanique de chacun d'eux ; tels encore les principes de la moindre action, de la conservation de l'énergie en quantité et de sa dégradation en qualité, conjointement avec un accroissement continu de l'entropie, considérée comme une scorie de l'énergie, etc.

Qu'on ne nous accuse pas de faire retentir ici une fanfare triomphale et d'entonner un hymne aux gloires de la science. Nullement : nous venons simplement de constater que nous connaissons déjà un certain nombre de choses, et il ne nous en coûte pas d'avouer que nous en ignorons une infinité d'autres. Nous ne perdons pas de vue la règle de conduite que Claude Bernard nous a tracée, qui est de toujours « garder la claire notion de ce que nous savons et de ce que nous ne savons pas » (2). Ah ! il est en effet bien étroit encore et bien exigu le champ défriché à ce jour. « Ce que nous savons est peu de chose », s'écriait Laplace en mourant

(1) J. Thirion, *L'Éther et les théories optiques*. REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES, janvier 1909.

(2) COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ; t. LXXXI, 2^e semestre, 1875 ; p. 1235.

et ce fut son dernier mot. Au delà de la voûte étoilée, objet de ses géniales études, qu'y a-t-il ? « De nouveaux cieux étoilés, répondait Pasteur pour lui ; soit ; mais au delà ? L'esprit humain, poussé par une force invincible, cessera-t-il jamais de se demander, qu'y a-t-il au delà ? (1) »

Il se le demandera toujours, nous le confessons humblement, car notre soif de savoir ne sera jamais entièrement assouvie ; notre esprit ne peut contenir l'immensité ! Le vase est trop petit !

Mais il peut en retenir quelque chose, et ce quelque chose, pour minime qu'il soit, n'est pas une quantité aussi négligeable que d'aucuns l'ont prétendu, dans une crise de découragement. En nous rappelant que « nous ne connaissons le tout de rien », Pascal s'est gardé de nous dire que nous ne connaissons rien du tout, car ce n'était pas sa pensée. Il n'est pas un savant qui n'ait le sentiment d'un certain acquis et d'une emprise déterminée sur le mystère, et qui ne l'ait proclamé une fois ou l'autre. Est-il rien qui nous dérouté plus que l'éther ? Il nous est uniquement connu par les phénomènes dont nous le faisons le facteur nécessaire. C'est lui pourtant que Lamé appelait « le vrai roi de la nature » ; il ne doutait pas, disait-il, de son existence incontestablement démontrée (2). Lord Kelvin affirmait non moins résolument que c'est « une réalité que l'on ne peut plus mettre en doute », et J. Bertrand, dont nous avons donné au début de cette étude quelques formules sceptiques, écrivait ce qui suit dans un mémoire lu dans une séance solennelle de l'Académie des Sciences : « Aucune main n'a touché l'éther, aucun œil ne l'a vu, aucune balance ne l'a pesé ; il est pourtant aussi réel que l'air et son existence est

(1) Pasteur, Discours de réception à l'Académie française : 1882.

(2) Lamé, *Leçons sur la théorie mathématique de l'Électricité*. Paris, p. 534.

aussi certaine » (1). Henri Poincaré disait d'autre part en 1912 : « Les anciennes hypothèses mécanistes et atomistes ont pris assez de consistance pour cesser presque de nous apparaître comme des hypothèses ; les atomes ne sont plus une fiction commode ; il nous semble, pour ainsi dire, que nous les voyons, depuis que nous savons les compter » (2).

Ces propos nous montrent que le jour où ils les tenaient, ces maîtres étaient moins sceptiques qu'ils ne nous sont apparus en d'autres moments, en d'autres circonstances et dans d'autres écrits. Nous ne mettons aucune malice à cette constatation, qui n'est point inspirée par le sentiment puéril et peu avouable de mettre de grands et solides esprits en contradiction avec eux-mêmes. Notre observation, qui s'étend à de nombreux savants, que l'on range, à tort peut-être, parmi les pragmatistes convaincus, répond à des considérations d'un ordre beaucoup plus élevé. Elles vont nous fournir le thème d'une étude psychologique intéressante par elle-même, qui nous permettra de jeter plus de lumière sur les questions que nous avons entrepris d'élucider. C'est le dernier aperçu que nous développerons et ce ne sera pas le moins curieux.

Il y a des gens qui doutent par dilettantisme ; ils cherchent le doute, parce qu'ils en ont le goût et y prennent plaisir. D'autres doutent par pose et par respect humain, car ils ne veulent pas être taxés de crédulité. Beaucoup doutent par amour de la controverse, qui leur paraît être le chemin de la vérité. Chez quelques-uns enfin, épris de certitude mathématique, le doute est

(1) *Éloge de Gabriel Lamé*. MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ; t. LXI. Les dernières théories relativistes d'Einstein et de Hauck n'invoquent plus l'éther ; mais, de ce qu'elles s'en passent, on ne peut conclure qu'elles démontrent qu'il n'existe pas.

(2) H. Poincaré, *Les rapports de la matière et de l'éther* ; conférences de la Société de physique de 1912 ; recueil déjà cité ci dessus, p. 357.

l'effet raisonné d'une conviction solidement assise, qui a scruté toutes les affirmations, vidé toutes les discussions et prétend n'avoir point entendu l'argument décisif qui impose l'adhésion sans réserve. C'est dans cette catégorie, la plus respectable et la mieux légitimée des sceptiques, que nous rangerons les savants, positifs et réfléchis, qui guerroient systématiquement contre la thèse explicationniste et dénoncent chez leurs adversaires les « faux enthousiasmes nés de fausses évidences ». Chez eux, le doute méthodique est devenu une discipline, et il s'est élevé à la hauteur d'une religion qui exerce sur leurs esprits une tyrannie impérieuse. Eh bien, on s'attendrait à ce que toutes leurs pensées, tous leurs écrits, tous leurs actes convergent vers cette négation de tout ce qui n'est pas l'évidence des faits et le témoignage de l'expérience. Or, cette unité de vues, cette homogénéité des jugements, cette harmonie dans l'effort ne se manifestent pas toujours dans l'exposé de leurs doctrines, ni dans le gouvernement de leur activité. Le doute raisonné des pragmatistes les plus qualifiés connaît des intermitteances ! Leurs coreligionnaires s'en offusquent parfois, mais en général ne leur en tiennent pas rigueur. Pour atténuer le mauvais effet de ces contradictions, ils ne veulent pas y voir des défaillances de principes et encore moins des apostasies. Ce ne sont que des concessions momentanées et courtoises, faites à des confrères dont on ne partage plus la foi, mais dont on respecte les croyances et qu'on ne voudrait pas contrister.

L'interprétation est habile, mais elle recourt à une échappatoire pour esquiver une difficulté. Il s'agit de bien autre chose que d'un assaut de politesse ; la question est d'un ordre plus élevé. Ces divergences dans l'expression des pensées des savants sont bien souvent un retour vers une tradition, dont on subit à nouveau

le charme, dont on regrette les séductions et qu'on se reproche d'avoir abandonnée ; elles sont quelquefois le résultat d'une lutte intime engagée dans leur conscience ; leur âme, affamée de vérité, obéit à son attrait vainqueur et fléchit devant elle. Je me rencontre ici avec les conclusions d'une remarquable étude de M. Rey, que j'ai déjà signalée.

Avant de les développer, établissons nettement le fait.

Voici d'abord quelques exemples topiques, à joindre à ceux qui ont été relevés ci-dessus.

Un ingénieur anglais, thermodynamiste renommé, Rankine, qui ne prêtait aux théories qu'une « valeur de commodité, ne surajoutant aucune connaissance à ce que l'expérience nous apprend », manifestera un jour une confiance inébranlable en ces mêmes théories, et il attribuera à leurs résultats « une valeur objective qui défie la critique ». Mach, le savant professeur de l'Université de Vienne, faisait de l'économie de pensée l'objectif le plus direct de la théorie, et il lui assignait comme but exclusif de « remplacer l'expérience par les opérations intellectuelles les plus courtes possible » ; son œuvre, disait-il, n'est pas d'accroître la dose de vérité fournie par l'expérience, mais « de rendre le savoir empirique plus assimilable » ; or, le même savant déclarait par ailleurs que nous pouvons acquérir une « conception unitaire du Monde, qui seule est compatible avec l'ordonnance d'un esprit sainement constitué ». Henri Poincaré, en écrivant que « l'existence réelle des corps est l'hypothèse la plus probable qu'on puisse faire à leur endroit », ou encore que « les hypothèses sur lesquelles repose la théorie ne sont ni vraies, ni fausses ; ce ne sont que des conventions commodes », avait donné des gages au pragmatisme ; par contre, il avait enseigné que « la théorie physique nous donne autre chose que la simple connaissance des faits », qu'elle nous fait découvrir les rapports réels des choses

les unes avec les autres, les véritables rapports des choses, ceux d'où résulte l'harmonie universelle. C'était lui qui avait fait cette remarque pleine d'idées qu'une « collection de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison ». Il avait résumé en ces termes la doctrine de M. Le Roy : « La science n'est faite que de conventions... ; les faits scientifiques et *a fortiori* les lois sont l'œuvre artificielle du savant ; ... la science ne peut donc rien nous apprendre de la vérité, elle ne peut nous servir que de règle d'action » : or, que pensait-il de cette doctrine ? Il l'avait combattue vivement, en déclarant qu'elle était « non seulement nominaliste, mais anti-intellectualiste » et qu'il était impossible de la suivre jusqu'au bout (1).

P. Duhem lui-même, qui écrivait en 1893 (2) qu'il est « absurde de chercher parmi les vérités métaphysiques, soit la confirmation, soit la condamnation d'une théorie physique », publiait en 1900 les lignes qui suivent : « La théorie physique nous confère une certaine connaissance du monde extérieur, qui dérive d'une vérité autre que les vérités dont nos instruments sont aptes à s'emparer ; l'ordre dans lequel la théorie range les résultats de l'observation... est ou tend à être une classification naturelle ». Et il concluait : « Il serait déraisonnable de travailler au progrès de la théorie physique, si cette théorie n'était le reflet de plus en plus net et de plus en plus précis d'une métaphysique ; la croyance en un ordre transcendant est la seule raison d'être de la théorie physique » (3).

(1) Poincaré, *La science et l'hypothèse*, p. 175 ; *La valeur de la science* p. 213.

(2) Duhem, *Physique et métaphysique*, LOC. CIT., p. 65.

(3) Ces premiers mots sont extraits d'un article déjà cité, *Physique et métaphysique*, paru dans la REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES en juillet 1893, p. 65 ; ceux qui suivent peuvent se lire dans la REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES, n° du 15 janvier 1908, p. 18, et dans le beau et profond ouvrage intitulé *La théorie physique*, p. 449.



Ces lignes sont sorties de la même plume qui soutenait contre Eugène Vicaire l'ardente polémique que nous avons racontée plus haut, mais en vérité elles ne sont pas écrites de la même encre. Quinze années de réflexions et d'études avaient porté leurs fruits. Si un successeur de Fontenelle publiait de nouveaux *Dialogues des Morts*, il ne manquerait pas de faire converser sur l'inconstance des opinions humaines les deux adversaires réconciliés.

Est-ce à dire que Duhem avait trouvé son chemin de Damas ? Bien qu'il n'y ait pas à rougir d'aller à Damas pour y trouver la vérité, nous ne le dirons pas ; nous ne dirons pas davantage que les variations d'opinion que nous relevons dans telles ou telles pages de nos maîtres sont des indices de versatilité, d'incohérence, de manque de suite dans les idées et une preuve d'absence de forte conviction. Dieu nous en garde ! Nous respectons et admirons trop ces maîtres pour nous le permettre.

Mais alors ? Comment interpréter la chose et s'en rendre compte, car il est impossible de feindre qu'on n'a rien vu, ni rien entendu ?

Nous chercherons à résoudre le problème en nous inspirant des considérations profondes que MM. Le Roy (1) et Rey ont indiquées avec une rare clairvoyance et que Duhem a contresignées très franchement.

Bertrand, Rankine, Mach, Poincaré, Duhem et les autres que nous avons cités ou que nous aurions pu citer, n'ont pas renié une première opinion pour en embrasser une autre ; ils ont subi une ambiance ou un

(1) Les idées de M. Le Roy ont été exposées dans un article de la REVUE DE MÉTAPHYSIQUE, année 1901, *Sur quelques objections adressées à la nouvelle philosophie* ; elles ont été rappelées, résumées et commentées dans les ouvrages de Poincaré et de Duhem, auxquels nous nous sommes référés ci-dessus.

état d'âme, ou plutôt ils ont passé parole à un second personnage qui se trouve en chacun de nous.

Et d'abord, les savants traversent, comme le commun des mortels, des jours ensoleillés et des jours sombres, au cours desquels ils sont plus ou moins portés à la confiance en leurs moyens d'action et dans les résultats de leur travail. Parfois tout leur sourit ; le lendemain au contraire les accable d'échecs et de déceptions ; las d'espérances, ils perdent alors la foi, s'attachent moins à leurs œuvres et ne leur prêtent plus le caractère définitif qu'elles semblaient posséder la veille. Ces sentiments sont très humains ; la science y paie son tribut, mais c'est le petit côté de la question, qu'il me suffisait d'indiquer.

Voici des aperçus plus pénétrants de M. Le Roy. Il y a dualité dans le physicien, ainsi que dans la physique. À côté de l'expérimentateur attaché à la glèbe, à côté de son secrétaire, qui note, qui classe, qui coordonne les faits, comme on range les livres sur les rayons d'une bibliothèque, vit et agit (nous croyons l'avoir démontré) le penseur, le philosophe, l'artiste, voire même l'esthète, à en croire Poincaré (1) : l'un travaille avec l'observation et la logique, l'autre avec l'intuition et l'imagination ; le premier cherche le vrai dans l'analyse des phénomènes, le second le poursuit dans la synthèse. Le réaliste voisine avec l'idéaliste. La science a, elle aussi, deux pôles ; comme ceux d'un aimant, ils exercent des attractions différentes : d'une part, la

(1) Dans un article de la REVUE DES DEUX MONDES, du 15 septembre 1912, M. Nordmann a cité les lignes suivantes très caractéristiques de Henri Poincaré : « N'avons-nous pas en nous quelque chose de plus grand que nous, une sorte de reflet divin qui, supérieur à notre volonté et à notre raison, nous rendrait capables d'exploits plus hauts que nous-mêmes ?... Là où nous avons cru que règne la seule volonté et la seule raison, nous voyons surgir quelque chose d'analogue à l'inspiration que la légende attribue aux poètes et aux musiciens ». Le jour où le grand mathématicien écrivait ces lignes, le soleil était radieux et l'artiste tenait la plume.

connaissance est ordonnée, précise, rigoureusement délimitée ; elle présente d'autre part des contours imprécis, vaporeux, et des horizons profonds où le regard se plonge souvent et se perd quelquefois.

Or le savant s'oriente vers un pôle ou l'autre. Le réaliste obéit à l'influence de l'ordre, de la méthode et de la rigueur ; il fait de la science une technique et non pas un art ; lié au terre-à-terre du phénomène, avide d'un savoir toujours plus riche de données positives, il n'a d'autre objectif que d'emmagasiner des faits nombreux et indiscutables. Tout l'intérêt d'une proposition réside alors pour lui dans sa commodité mnémotechnique et pratique ; désespérant de comprendre, il se borne à connaître. Ce jour-là, il est pragmatiste. Mais ce criticisme ne satisfait pas notre savant tout entier. Le second homme qui est en lui prendra sa revanche un autre jour. L'idéaliste se ravise : l'érudition n'est que le squelette de la science ; il faut porter ses regards plus haut. L'intuition le conquiert et le domine, l'imagination l'entraîne, il admire la beauté des théories, et voilà qu'il s'abandonne à la mentalité explicationniste, dont la méthode plus avenante a plus de sourires pour lui et lui promet plus de jouissances et plus de succès. Il se laisse emporter dans une envolée superbe : c'est l'accès d'enthousiasme.

Cessons donc de voir, dans les deux écoles dont nous avons exposé les systèmes, deux camps ennemis, dressant leurs tentes les unes en face des autres. En réalité, ce sont deux tendances qui transparaissent souvent dans le même sujet et déterminent le sens de son action, suivant que ses facultés se tournent vers un pôle ou vers l'autre. La sagesse conseillerait de se tourner vers l'un ou vers l'autre, opportunément, et indépendamment de toute idée préconçue. Un savant animé d'un juste sentiment de la mesure et d'un véritable amour de l'équilibre et de l'harmonie, celui qui se plaît aux « coteaux

modérés » se gardera, comme Duhem le lui a suggéré, (le Duhem de la seconde manière), « des folles ambitions du dogmatisme comme des désespoirs du pyrrhonisme », pour se maintenir ainsi « en cet état de parfait équilibre, d'où il peut sainement apprécier l'objet et la structure de la théorie physique » (1).

Laplace avait déjà adressé le même avertissement à ses contemporains un siècle plus tôt, quand il écrivait ces lignes : « Le philosophe vraiment utile au progrès des sciences est celui qui, réunissant à une imagination profonde une grande sévérité dans le raisonnement et dans ses expériences, est à la fois tourmenté par le désir de s'élever aux causes des phénomènes et par la crainte de se tromper sur celles qu'il leur assignerait » (2).

Pour ce philosophe-savant, l'expérience reste le critérium de la vérité, mais elle n'en est point la source unique. .

Pour lui, la crainte de se tromper sur les causes qu'il est tenté d'assigner aux phénomènes est le prudent correctif du désir de s'élever à ces causes : mais ce scrupule ne le fera pas renoncer à ses plus nobles ambitions.

Pour lui, hypothèses et théories sont avant tout des instruments de travail, des outils de recherche ; il y voit un *objectum quo* plutôt qu'un *objectum quod* ; il n'oublie pas que, d'après la formule classique, l'objet est dans le connaissant, selon le mode d'être du sujet connaissant, et que son esprit déforme plus ou moins ce qu'il saisit ; que notre manière de nous figurer les choses n'est pas une superposition exacte du jugement

(1) Duhem s'inspirait de Pascal : « nous avons une impuissance de prouver invincible à tout le dogmatisme ; nous avons une idée de la vérité, invincible à tout le pyrrhonisme ».

(2) Ces paroles de l'illustre astronome ont été rappelées par Biot dans ses *Mélanges scientifiques et littéraires*, t. II, p. 209 ; elles se lisent dans l'*Exposition du Système du Monde*, et ont été citées dans les *Lectures scientifiques* de M. Gay, à la p. 767.

à l'objet, une *adaequatio rei et intellectus*, une égalité. Il voit et sait tout cela. Mais la connaissance plus ou moins exacte que nous acquérons des choses de la nature est une connaissance quand même. La représentation que l'on s'en fait n'est pas une photographie, c'est un portrait ; pourquoi ce portrait ne réaliserait-il pas une certaine conformité avec l'objet représenté, et serait-il nécessairement dénué de toute ressemblance ? Pourquoi n'y aurait-il pas là un reflet de vérité ? Est-ce que nous ne lisons pas dans le spectre de la lumière renvoyée par une planète la constitution du Soleil dont le rayon est parti ?

Les choses, a-t-on dit sentencieusement, peuvent se représenter de bien des façons, mais elles ne se passent que d'une seule manière. C'est vrai ; mais ce n'est pas à dire que cette unique manière ne pourra jamais coïncider avec notre concept. Le nombre de manières n'est pas infini, et la science ne fait que débiter ; le temps travaille avec elle et pour elle. On découvrira beaucoup de choses, au cours des siècles, dont nous n'avons en ce moment pas la moindre idée.

L'hypothèse n'est donc point réduite au rôle d'objet purement symbolique et fantaisiste, ne possédant aucune conformité de nature avec la réalité ! C'est non seulement un moyen de connaître, mais encore de comprendre, dont il ne faut pas mésuser, mais dont il serait coupable de ne pas user.

« La certitude de ne jamais atteindre l'absolu ne doit pas nous décourager de serrer de près la réalité », a dit très justement A. de Lapparent (1).

(1) *Loc. cit.* : p. 240. Notre éminent collègue des Facultés catholiques de Paris se riait agréablement, au même endroit, des physiciens qui « jongleraient trop audacieusement avec les idées représentatives » ; mais le conditionnel employé et le contexte montraient bien qu'il ne traitait pas de jonglerie l'usage rationnel de ces représentations, auquel son brillant esprit recourait à l'occasion, et dont il savait tirer le meilleur parti.

* « Si dans le passé on a eu trop de confiance dans la puissance du génie humain, se croyant très près de découvrir la raison suprême des choses, on tombe à présent dans l'excès contraire » ; c'est l'avis de M. Righi. Il l'énonce au début d'une étude très documentée des plus récentes théories des phénomènes électriques (1). L'excès consisterait à ne voir dans ces merveilleuses théories que des chimères.

M. J. J. Thomson y voit bien autre chose : « En fait, déclare-t-il, le fluide électrique nous est actuellement mieux connu que d'autres fluides, tels que l'air et l'eau » (2). Relevons ce propos, car nous savons pas mal de choses sur l'air et sur l'eau. Les hypothèses et les théories de l'électricité correspondent par conséquent en quelques points à la réalité, et il est permis de croire que ces correspondances deviendront de plus en plus nombreuses et de plus en plus étroites : nous ne prétendons pas démontrer autre chose avant de nous engager dans ces études.

Nous devons le faire : c'est fait ! -

Parmi ces théories, il en est une qui, après avoir acquis droit de cité dans la science, en avait ensuite été bannie, parce qu'elle avait cessé de s'harmoniser avec des faits, ultérieurement découverts ; d'autres lui ont succédé, qui ont subi le même sort, pour la même raison. Mais les théories meurent rarement tout entières. Le mouvement de la science se poursuit avec logique et avec suite ; on l'a comparé au progrès de la vie dont chaque état subsiste dans l'état suivant, et on peut lui appliquer le jugement de Paul Bourget, que

(1) Righi *La Théorie Moderne des phénomènes physiques* (Traduction Neculcea ; Paris, 1906), p. 6.

(2) J. J. Thomson, *Electricity and Matter*, p. 89 ; citation en exergue de M. Drumaux, dans la *Théorie corpusculaire de l'Électricité* (Paris, Gauthier-Villars, 1911).

l'on ne s'attendait peut-être pas à entendre citer dans un travail scientifique : « Vivre, c'est évoluer, mais c'est aussi durer ».

Pour devenir acceptable, il suffit souvent à une doctrine de quelques modifications ou corrections, qui lui permettent de reprendre plus étroitement contact avec la réalité.

C'est ce qui est arrivé.

Et l'on se prend à augurer que la science pénétrera de plus en plus profondément dans la connaissance de l'électricité, cette chose si pleine d'énigmes, si grande et si puissante, que l'on soupçonne d'être, avec l'éther, le principal d'entre les matériaux de l'Univers.

CHAPITRE II

LA THÈSE DE LA SUBSTANCE ET DE L'ACCIDENT

L'électricité, cette chose si multiple dans ses aspects et si puissante dans ses effets, est-elle vraiment aussi mystérieuse qu'on avait pris autrefois l'habitude de le dire ?

Nos enfants, dont le berceau a été éclairé par la blanche lumière d'une lampe à filament métallique, qui ont entendu, dès leurs premiers ans, des voix connues sortir du téléphone et vu les rayons X peindre sur un écran et fixer sur une plaque les contours du squelette de leur main potelée, qui ont appris qu'on télégraphiait à travers les océans, même sans fil, ne comprennent déjà plus que l'on ait pu s'étonner de ce que des voitures sans cheval roulaient sur des rails dans les rues des grandes villes et sur les routes du pays, et ils donnent raison au mot de Montaigne, disant que « l'habitude des choses nous en ôte l'étrangeté » ; familiarisés avec les actions électriques dès leur apprentissage de la vie, ils les trouvent fort naturelles et ne les estiment pas plus incompréhensibles que la puissance motrice du feu et l'effet photographique de la lumière. Nous-mêmes, façonnés par l'accoutumance à ce qui avait si fort intrigué nos pères, nous pressons le bouton d'une sonnerie électrique d'appel avec la même spontanéité que nous tirons le cordon d'une sonnette.

De fait, l'électricité ne soulève pas plus d'énigmes que n'importe quel autre agent physique : Joseph Bertrand en est convenu, et nous avons reproduit son témoignage dans un précédent article. D'ailleurs, bien des obscurités sont déjà dissipées et ceux qui n'ont pas la prétention de découvrir « le pourquoi du pourquoi » et de scruter à fond les profondeurs de l'inconnaissable, ont déjà lieu d'être satisfaits. Si, dans l'opinion courante, l'électricité semble encore habiter des régions moins accessibles et plus imprégnées de mystère, cela tient à des causes qui ne sont pas toutes essentielles à sa nature.

Faisons observer d'abord que cette science est venue après toutes les autres, car elle ne remonte guère au delà des expériences de Grey et de Dufay, qui portent les dates de 1727 et de 1734. Elle a conquis dès lors, avec une impressionnante rapidité, des positions exceptionnelles dans tous les domaines du savoir théorique, des applications domestiques et des utilisations industrielles. En moins de temps qu'il ne nous en fallait pour l'apprendre aux générations successives du siècle dernier, la mise en œuvre de cette forme supérieure, forte et souple, de l'énergie, révolutionnait les conditions du vieux monde et en bouleversait les idées et les mœurs. Ce que l'on n'avait su prévoir en imposait davantage à l'esprit.

D'autre part, ce quelque chose que nous appelons électricité, ne se manifeste directement à nous par aucun de nos sens ; il nous a fallu découvrir son existence, car nous sommes aveugles, sourds et insensibles aux phénomènes électriques, tant qu'ils ne donnent pas lieu à une transformation de leur énergie. Nous n'avons aucunement conscience d'un champ constant magnétique ou électrique dans lequel nous restons plongés, et

ne sommes affectés que par sa brusque suppression, ainsi qu'il nous arrive dans ce qu'on appelle le « choc en retour », provoqué par la décharge d'un nuage, placé au-dessus de nos têtes. Rien ne trahit non plus à nos yeux l'état d'un conducteur porté à des milliers de volts, qui nous terrasserait d'une secousse mortelle, si nous venions à le toucher sans être isolés du sol. L'humanité a vécu de longs siècles avant de se douter qu'il y eût de l'électricité dans le monde : ce qui avait pu rester si longtemps ignoré devait paraître mystérieux.

Enfin, à la surprise de la découverte se joignit une nouveauté dans la chose elle-même. Quand on eut pris contact avec le magnétisme et l'électricité, on leur reconnut un caractère spécial, qui n'avait pas encore été observé. Ici, les propriétés sont organisées polairement, ce qui veut dire qu'elles possèdent deux faces symétriques ; cela se traduit par le fait qu'elles affectent deux formes qui ne se doublent pas toujours par addition de deux valeurs égales et peuvent aussi bien s'annuler. Ce dualisme compliquait le concept que l'on pouvait se faire de l'agent du phénomène : à dire vrai, on n'en connaissait pas d'autre exemple. La singularité des phénomènes d'ordre électrique les entourait d'ombre et paraissait les rendre plus impénétrables.

Cette double polarité ne soulevait toutefois pas de difficulté insurmontable. En tous cas, elle n'arrêta pas longtemps les physiciens du XVIII^e siècle, que n'effrayait pas le nombre des hypothèses et qui en imaginèrent tout simplement une de plus : au lieu de dire « l'électricité », ils dirent « les électricités », et leur conscience de savant ne s'en troubla pas. Écoutons Dufay, qui avait établi la distinction entre les deux modes d'électrisation. « Il y a deux sortes d'électricités très différentes l'une de l'autre : l'une que j'appellerai électrique citée vitrée et l'autre électricité résineuse : le caractère

» de ces deux électricités est de se repousser elles-mêmes et de s'attirer l'une l'autre ». Il écrivait encore : « Les électricités de même espèce paraissent » ennemies et celles de différente espèce amies ». On attribue à Franklin et à Symmer l'usage de marquer du signe + l'électricité du verre, et du signe —, celle de la résine, ce qui mettait en évidence que des quantités numériquement égales s'annulent en s'ajoutant. Par juxtaposition de quantités préexistantes ou par mariage et combinaison, il se constitue quelque chose de neutre et d'inactif, dont tous les corps sont imprégnés. Ce quelque chose peut être disjoint ou dissocié sous des influences diverses ; la première de celles-ci qui ait été connue était le frottement, par lequel une masse d'électricité ne se développe jamais sur le frotteur sans qu'il apparaisse sur le frotté une masse égale et de signe contraire, ainsi qu'en témoignait une expérience d'une simplicité enfantine. On attribuait la séparation au travail dépensé dans l'acte, et c'était rationnel ; mais pourquoi est-ce ce corps-ci, et non pas celui-là, qui devient positif ? Nous nous le demandons encore.

Pour expliquer l'attraction et la répulsion des corps légers par le bâton frotté, il fallut admettre que l'électricité était liée à la matière, son support, par des forces qu'on appela *pondéro-électriques*. Elles se manifestent visiblement dans les corps mauvais conducteurs, que Désaguliers sut distinguer des bons conducteurs : sur les premiers, l'électricité colle et s'attache au point où elle a été déposée, alors qu'elle est libre de se mouvoir sur les seconds. En prêtant une mobilité suffisante aux électricités dans les substances conductrices, on rendait compte des phénomènes d'influence. Un conducteur étant donné, isolé du sol, le voisinage d'un corps électrisé y sépare les éléments de la matière neutre qu'il renferme, et donne à celui-ci, du côté du corps agissant,

une charge de signe contraire, du côté opposé, une charge de même signe. Vient-on à toucher du bout du doigt n'importe quel point du conducteur influencé, l'électricité de même signe, chassée le plus loin possible, s'écoule dans le sol, tandis que la charge de signe contraire se distribue sur la surface du conducteur, suivant une loi qui dépend de sa forme. La répulsion exercée par les éléments de la charge sur eux-mêmes les met dans un état de tension, qui les porterait à abandonner la surface du conducteur, si la résistance de l'air extérieur isolant n'entravait leur mouvement. Mais ils s'échappent quand même à la longue, et l'on observe une déperdition plus ou moins rapide, dont on peut analyser les causes. Le rôle et le pouvoir des pointes, les phénomènes observés dans le cylindre de Faraday, la fonction d'écran exercée par une enveloppe conductrice mise à la Terre, le fonctionnement des électroscopes, le jeu de l'électrophore et ses machines, etc., et d'autres exemples, que les souvenirs classiques du lecteur joindront à ceux que nous leur rappelons, montrent que la théorie des deux électricités permettait de grouper aisément les premières apparences observées, d'une manière très satisfaisante pour des esprits qui n'en demandaient pas davantage pour croire à la réalité de l'image adoptée, disons plus, d'une manière tellement suggestive, que nos esprits prévenus en subissent encore aujourd'hui le charme et l'obsession.

L'hypothèse faisait indiscutablement des deux électricités quelque chose de matériel : on y voyait des substances de même espèce, mais de qualités opposées, que l'on dotait de la faculté essentielle à leur nature, d'agir les unes sur les autres sans se toucher, *comme si* elles agissaient à distance (1) ; on s'y prenait avec les

(1) En métaphysique, la substance est le support des qualités par lesquelles les êtres arrivent à notre connaissance ; on oppose la substance à l'accident, qui est sa manière d'être. L'esprit forme l'idée de substance par l'abstraction,

électricité comme avec les autres agents connus de la physique : si l'on avait depuis longtemps renoncé aux atomes du son d'Épicure, on adhérerait encore au concept des particules calorifiques et lumineuses. C'était dans la tradition, et l'on croyait fermement que cela correspondait à la réalité.

Restait à savoir quelle était cette substance, ne marquant pas sa présence à la balance, inépuisable, indestructible, à laquelle on imposait de pouvoir se glisser entre les intervalles moléculaires des métaux les plus denses et les plus compacts. Il était indiqué de lui imposer une extrême ténuité. Descartes, qui ne connaissait sans doute de l'électricité que ce qu'en avait écrit Gilbert (1), faisait de l'électricité une *materia fluidissima*, dont les éléments *versus omnes partes transire possunt*. Soixante ans plus tard, Newton spécifiait la subtilité de la substance par les mots d'*exhalatio tam rara tamque subtilis* (2). A en croire Cournot, qui ne cite pas son auteur, « quelques-uns considéraient que les impondérables occupaient dans la série des existences un rang intermédiaire entre les corps et les esprits, pour parler, dit-il, le langage de l'ontologie, entre les substances corporelles et les substances spirituelles » (3). Pour la plupart, l'électricité devint un gaz, ou une huile très volatile. Il semble que ce soit au Genevois Jallabert que nous devons le mot, moins précis et plus général, de *fluide*, qui est resté. L'abbé Nollet employait couramment le

en distinguant ce qui est permanent de ce qui est soumis à des changements. Leibniz avait défini la substance : *ens agendi vi præditum* ; la formule satisfaisait mieux les hommes de science que les philosophes ; elle convient bien à l'électricité, qui est une forme de l'énergie.

(1) La *De Magnete, magneticisque corporibus physiologia* a été publiée à Londres, en 1600 ; dans son *Histoire de l'Électricité*, Priestley faisait de Gilbert le père de l'électricité.

(2) J'extrai ces renseignements du *Dictionnaire de physique*, du P. Aimé Paulian (Avignon, 1761).

(3) Cournot, *Traité de l'enchaînement des idées*.

mot vers 1740 ; Franklin en soulignait le sens en rappelant qu'il s'agissait d'une *matière*. Coulomb disait « les fluides » en 1785, mais en se défendant « d'indiquer les véritables causes de l'électricité », et non sans laisser percer quelque incrédulité. Volta fait usage du mot, dès lors consacré, dans sa célèbre lettre au président de la Société Royale de Londres, du 20 mars 1800, dans laquelle il décrivait ses piles à colonne et à couronne de tasses. Ampère, de la Rive, Becquerel, Gaugain, Pouillet, etc., traitaient les fluides comme des réalités, mais en se gardant de trop insister. C'était sagesse de leur part. Il était en effet préférable de ne pas préciser ce qui pourrait rester celé derrière cette expression qu'on laissait flotter dans le vague, de propos délibéré. Un point se trouvait admis par tous, parce qu'il paraissait établi par l'expérience : c'est que l'électricité, qu'elle fût positive ou négative, était une *chose*, constituant une grandeur *sui generis*, ayant son existence propre, réelle, individuelle, résidant en des points déterminés, présentant une continuité dans sa forme et une homogénéité dans sa substance, possédant d'ailleurs des propriétés spéciales et impliquant un concept précis de quantité, fondé sur ses actions extérieures.

Nous allons montrer que, sur cette base hypothétique, s'était construite une théorie scientifique, qui donnait satisfaction aux esprits les plus exigeants et qui n'a rien perdu de sa haute valeur, sous réserve de l'interprétation qu'il faut lui donner.

La charge d'un corps, c'est la quantité qu'il possède.

Cette quantité exerce des actions autour d'elle ; les forces qui en émanent ont fait connaître l'électricité : nous n'avons pas d'autre moyen de savoir qu'elle est présente et combien il y en a. Le moyen suffit.

Coulomb réussit heureusement à mesurer ces actions. Une charge ponctuelle Q agit sur une autre Q' , placée à

une distance r , avec une force qui est égale à $k \frac{QQ'}{r^2}$, le paramètre k dépendant du milieu interposé et aussi d'une convention arbitraire dont on dispose pour le choix de l'unité. Faisant k égal à un dans l'air, on fut conduit à prendre pour *unité de quantité* celle qui agit sur une quantité égale, placée à une distance d'un centimètre, avec une force égale à une *dyne*, la dyne étant l'unité de force dans le système C.G.S. (1) L'électricité se trouvait ainsi mesurée et jaugée avec une rigueur mathématique ; cette mesure, indépendante de l'idée particulière qu'on se fait d'une masse d'électricité, doit être portée à l'actif de la théorie des fluides-substances, sous l'empire de laquelle elle a été adoptée.

Isolons une quantité Q . Elle crée autour d'elle un champ d'action, auquel on a donné le nom de *champ électrique* ; des forces s'exercent dans cette région de l'espace conformément à la loi de Coulomb. La charge d'un corps est formée par le groupement d'un certain nombre de ces quantités Q , que nous symboliserons par le signe ΣQ . Supposons quelque part dans leur champ, en un point P , l'unité de quantité ; celle-ci sera soumise à la résultante des actions des quantités Q . La question s'était déjà posée à peu près dans les mêmes conditions à Laplace et à Gauss, en attraction newtonienne ; elle les avait conduits à la considération d'une fonction V des coordonnées du point P , dont la valeur se calcule en faisant le quotient de chacune des charges élémentaires qui produisent le champ, par sa distance r au point P . Cette fonction, égale à $\Sigma \frac{Q}{r}$, a reçu le nom

(1) L'unité de quantité, dont il s'agit ici, est l'unité électrostatique. Le *Coulomb*, mieux connu de quelques-uns de nos lecteurs, est l'unité de quantité du système électromagnétique pratique, égale au dixième de l'unité absolue du même système. Cette unité équivaut à 30 milliards d'unités électrostatiques. Nous prions de retenir ce nombre : 30.10^9 , car nous le retrouverons.

de *potentiel* en P. On aboutit encore à la notion de potentiel en observant que le travail accompli dans le déplacement d'une quantité d'électricité d'un point du champ à un autre, sous l'action des forces centrales auxquelles elle est soumise, est indépendant du chemin suivi : le travail de ces forces, pour le transport de l'unité de quantité entre ces deux points, est précisément égal à la variation du potentiel entre ces points. L'identité, ou du moins l'analogie profonde qui existe entre les phénomènes newtoniens et ceux de l'électrostatique (1), et le concept pour ainsi dire moléculaire de la quantité d'électricité ont fait bénéficier la théorie électrique de l'acquis d'une théorie mécanique solidement établie. Lord Kelvin est parti de là pour introduire la notion de l'énergie dans l'étude des phénomènes électriques.

Un instrument admirable de travail est né de ces rapprochements ingénieux ; qu'on me pardonne d'en tracer une rapide esquisse. Les *lignes de force* passant par les divers points d'un contour fermé, tracé sur une surface équipotentielle, forment dans l'espace la surface latérale d'un canal, auquel on a donné le nom de *tube de force* ou de tube d'induction, parce qu'on y canalise le *flux de force*, égal au produit de la section du tube par la force normale à l'équipotentielle. Un diagramme, dessinant ces surfaces, ces lignes et ces tubes peint aux yeux la constitution du champ. D'origine purement géométrique, cette épure permet d'expliquer et de prévoir ce qui se passe dans le champ ; elle correspond du reste à une réalité, dont on peut s'assurer en explorant le champ par une aiguille aimantée. La loi de Coulomb s'appliquant aux masses magnétiques comme aux masses électriques, tous les artifices précédents s'appliquent aux champs magné-

(1) La théorie newtonienne ne connaît que des attractions.

tiques, et une glace, saupoudrée de limaille de fer, fait voir plus aisément encore la belle ordonnance des lignes de force qui sillonnent le champ entourant un aimant. La concordance est rigoureuse entre les conclusions de la théorie et la réalité des faits pratiques.

D'autres exemples, empruntés à des domaines connus, plus accessibles à l'expérimentation, ont apporté à la théorie matérielle dualistique un secours et un appui qui ont contribué à ses progrès tout en développant l'illusion de sa réalité. Si l'on réunit par un fil doué de conductibilité, deux conducteurs quelconques, établis à des potentiels différents, ceux-ci s'égalisent par un transport d'électricité du corps au potentiel le plus élevé à l'autre : ce transport a son analogue dans le flux de chaleur allant d'un corps plus chaud à un corps moins chaud ; le potentiel caractérise par conséquent l'état électrique d'un conducteur au même titre que la température caractérise son état thermique, et la qualification de « température électrique » donnée au potentiel aide à l'intelligence des phénomènes. On compare encore avantageusement ce transport d'électricité au transvasement de liquide s'effectuant entre deux récipients, situés à des niveaux différents : l'état hydrodynamique de ces liquides correspond aux potentiels des charges des deux conducteurs. Les potentiels sont rapportés à celui du sol, pris pour zéro, de même qu'on rapporte les altitudes au niveau de la mer. On ne pouvait voir en tout cela que des images, des illustrations, des « modèles » à la façon anglaise, mais leur emploi était commode et conduisait aux utiles notions de la *force électromotrice* résultant d'une différence de potentiel, et de la *capacité* C des conducteurs, définie par la charge nécessaire pour les porter au potentiel unité. Tout corps électrisé, au potentiel V , est doté d'une certaine énergie, qu'il peut actualiser dans sa décharge, égale à $\frac{1}{2} CV^2$, ce que l'expérience

de Riess a justifié rigoureusement. Le bénéfice de ces considérations n'aurait-il été que de provoquer les expériences qui ont paru les confirmer, que nous leur devrions l'attention rétrospective méritée par les illusions fécondes. De plus, celles-ci sont tenaces, et nous n'avons pas toujours réussi à nous en dégager, ainsi que nous allons le voir.

Le milieu isolant, qui forme le fond du champ, sillonné de lignes de force, a reçu le nom de *diélectrique*, parce que les actions électriques s'exercent et se propagent à travers sa substance. Helmholtz et lord Kelvin considéraient ce milieu comme constitué par des particules conductrices ou des cellules, noyées dans une sorte de ciment isolant, entravant leur translation tout en leur permettant de s'orienter; pour lors, ces éléments prendraient des pôles par influence et dirigerait leurs axes suivant les lignes du champ; cette modification intime, qui ne laisse pas que de se manifester par des changements physiques, est désignée par le mot de *polarisation*, dont les physiciens ont fait un usage si abusif (1). Cette hypothèse a permis de rendre compte de nombreux phénomènes, notamment de ceux que l'on observe dans les condensateurs, formés de deux armatures conductrices parallèles, séparées par une lame diélectrique. Les forces qui s'exercent entre ces armatures seraient dues, non seulement à leurs charges respectives, mais aussi à celles des cellules, dont la présence augmente la capacité du système et permet de faire accepter aux armatures, pour une différence de potentiel donnée entre elles, une charge plus considérable; c'est cette augmentation qui définit le *pouvoir*

(1) Ce concept des diélectriques correspond à celui des corps magnétiques : on parle de leur perméabilité comme pour les aimants, et on leur prête une intensité d'électrisation. Les forces à distance sont invoquées dans cette manière de voir; elles interviennent dans les phénomènes d'influence, par une action sur les cellules, dont Poisson a fait le point de départ d'une théorie restée célèbre.

inducteur spécifique K de la substance diélectrique, dont la valeur est inverse de celle du paramètre k de la formule de Coulomb, relatif au milieu constituant le champ. Ces diverses hypothèses s'adaptent bien au cas d'un seul diélectrique homogène remplissant un champ uniforme, mais elles présentent de grandes difficultés d'interprétation dans le cas de plusieurs diélectriques de nature différente et de champs qui ne sont plus uniformes, pour lesquels la constante k varie d'un point à un autre. La théorie de l'électricité matérielle rencontrait là des problèmes qu'elle n'a pas résolus ; mais les autres théories ont-elles obtenu plus de succès depuis lors ?

Vient-on à jeter un pont entre les deux armatures de notre condensateur, par un fil conducteur, et voici qu'aussitôt s'opère la neutralisation de leurs charges par le canal du fil : la quantité positive part de l'armature au potentiel le plus élevé et se rend vers celle qui est au potentiel le plus faible ; la première armature descend l'échelle des potentiels, l'autre la remonte ; le mouvement se poursuivra jusqu'à ce que les deux électricités se soient recombinaées. Il durerait toujours, si une source maintenait constante la différence de potentiel. On a dit qu'un *courant* parcourt le fil et nous le disons encore : nous parlons le langage de l'hydraulique. L'analogie du fil d'eau qui coule dans le sens des charges décroissantes a fait attribuer au courant électrique le sens du mouvement de la seule quantité positive ; mais il ne s'agit plus ici que d'une manière de parler commode (c'est sa seule excuse), qui a conduit à la définition de l'intensité du courant par la quantité qui traverse par seconde un point quelconque du circuit ; l'analogie hydraulique concorde avec la loi d'Ohm et de Joule. Cela suffisait aux premiers maîtres, et nous ne sommes pas plus difficiles qu'eux. C'est qu'en effet la fiction admise a conduit à des résultats remarquables,

qui devaient constituer un des plus solides arguments en faveur de la thèse de l'électricité-substance, dont elle était issue : l'importance de ce point de vue justifiera les développements dans lesquels je vais entrer. Je les abrègerai le plus qu'il me sera possible, pour ne pas abuser de l'attention de ceux qui savent déjà ce que je vais dire : mais, parmi mes lecteurs, quelques-uns n'ont pas creusé à fond la question, et d'autres ont pu oublier.

Pratiquons une coupure dans un circuit métallique, — c'est la meilleure manière de découvrir ce qui s'y passe — et insérons-y une colonne d'un de ces liquides auxquels Faraday a donné le nom significatif d'*électrolytes*. Le courant entre dans le liquide par l'électrode positive, l'*anode*, et il va, par le liquide, à l'électrode négative ou *cathode*. Un dépôt de métal se forme sur celle-ci, en même temps que le radical s'accumule sur l'anode et autour d'elle ; entre les électrodes rien ne dénonce le passage de l'électricité, ce que l'hypothèse de Grothus faisait comprendre tant bien que mal. Mais la moindre dépense d'énergie suffisait pour commencer l'électrolyse ; c'était moins aisé à expliquer, car il fallait admettre que les *ions* de la dissolution aqueuse du sel ne sont plus unis par aucune force, lorsque le courant commence à passer. Arrhénius en conclut que la dissociation libératrice était antécédente à la création du champ, et n'était pas son œuvre. Il admit donc que la dissolution du sel dans l'eau avait rompu sa molécule et l'avait scindée en deux atomes ou groupes atomiques, possédant des charges électriques égales et opposées, le métal étant $+$ et le radical $-$; plus grande est la dilution, plus il y a de molécules divisées. Le phénomène s'appelle la *dissociation électrolytique* : le produit en sont les *ions*. Ces ions errent en liberté dans le liquide, sans direction préférée, en vertu de la chaleur interne de l'électrolyte. Les chocs

qui ont lieu entre eux et avec les molécules restées entières provoquent d'incessants divorces et remariages, mais le nombre des atomes disjoints et libres demeure invariable, tant que la concentration ne varie pas. Aussitôt que le courant passe, les ions obéissent aux forces électriques qui les dirigent ; arrivés au contact des électrodes vers lesquelles ils sont appelés, ils leur cèdent leurs charges et redeviennent neutres en s'y fixant : quant au liquide, il n'est électrolysé que là où il perd des ions, par conséquent seulement sur les électrodes. Il naît ainsi un phénomène de convection sous l'action du champ compris entre les électrodes ; il correspond à deux trains d'atomes ou de groupes d'atomes, porteurs de charges électriques de signes contraires.

Or, ces charges sont calculables, par application des lois de Faraday et d'Avogadro.

Un gramme d'ions hydrogène transporte 96 490 coulombs, soit 9649 unités électromagnétiques absolues ou $9649 \times 30 \times 10^9 = 289\,490 \times 10^7 = 29 \times 10^{13}$ unités électrostatiques de quantité environ. Cette quantité a reçu le nom de *faraday*. Les ions d'un élément quelconque monovalent (1), (tel que K, Na, Ag, +, ou Cl, I, AzO³, —), quelle que soit leur masse, portent un faraday ; un élément bivalent (Cu, Fe, +, ou SO⁴ —) porte deux faradays. En d'autres termes, tous les ions monovalents possèdent la même charge, qui est doublée pour les bivalents, triplée pour les trivalents, etc. Quant aux masses des éléments, elles sont exprimées par un nombre de grammes égal à leur poids atomique ou moléculaire. La masse de l'hydrogène étant 1, celle de Cl est 35, 5, celle de Na, 23, on dit que la valeur

(1) La valence exprime la faculté des atomes à se substituer les uns aux autres, vis-à-vis d'un atome d'hydrogène : nous disons donc monovalent l'atome capable de s'ajouter ou de se substituer à un atome d'hydrogène.

de leur atome-gramme est 1 ; 35 5 ; et 23 ; la molécule-gramme NaCl vaut 58, 5.

Je m'excuse de ce rappel de notions aussi élémentaires, mais je n'ai pu m'en dispenser, attendu que le calcul de la quantité d'électricité, charge de chaque atome ou molécule, repose sur ces chiffres. En effet, la loi d'Avogadro nous fait connaître le nombre N d'atomes, contenus dans l'atome-gramme d'une substance quelconque : ce nombre, identique pour tous les corps, est une constante universelle. Sa valeur est connue aujourd'hui avec une précision remarquable et inespérée (1) : nous la prendrons égale à 70×10^{22} .

La masse de l'atome hydrogène est dès lors de $\frac{1}{70 \times 10^{22}}$, celle du chlore, $\frac{35,5}{70 \times 10^{22}}$, etc.

D'où la charge de tous les atomes monovalents est égale à $\frac{9649}{70 \times 10^{22}} = 1,4 \times 10^{-20}$ unités électro-magnétiques absolues ou $\frac{29 \times 10^{13}}{70 \times 10^{22}} = 4,1 \times 10^{-10}$ unités électrostatiques de quantité. Notons soigneusement cette valeur, que nous désignerons par le symbole e (2) ; elle possède une importance théorique considérable, car nous la retrouverons par des considérations et dans des circonstances absolument différentes, et elle nous fournit un argument de la plus haute portée, en faveur de l'hypothèse de la matérialité, qui nous l'a fait découvrir et nous a permis de la calculer.

J'aurais encore à porter à l'actif de cette hypothèse plusieurs autres échappées dans le domaine de l'inconnu ; je me bornerai à les mentionner brièvement.

(1) M. J. Perrin a montré que la valeur N, déterminée par 13 procédés différents, est comprise entre 65 et 72×10^{22} (Conférence déjà citée, les *idées modernes*, etc. page 52) ; on prend généralement la valeur moyenne de 70×10^{22} .

(2) La charge e est le cent millième environ de la quantité minimum décelable à l'électromètre le plus sensible.

Dans l'électrolyse, les ions se déplacent, ainsi que nous l'avons vu, sous l'action du champ créé dans le liquide par la présence de l'anode et de la cathode ; leur mouvement, paralysé par la résistance d'un liquide plus ou moins visqueux, est lent et uniforme, mais la vitesse des ions + et des ions - (des cathions et des anions) n'est pas la même ; elle est proportionnelle à l'intensité F du champ et on l'écrit $K_c F$ et $K_a F$. Les coefficients K_c et K_a sont les *mobilités* des cathions et des anions. On les a mesurées : on a trouvé pour l'hydrogène une vitesse d'un tiers de millimètre environ par seconde dans un champ d'un volt par centimètre ; celle de l'ion SO^4 est près de trois fois moindre. Ces différences de vitesse se trahissent par des pertes de concentration inégales autour des électrodes. Ainsi, dans l'électrolyse d'une dissolution de sulfate de cuivre, la liqueur s'appauvrit plus rapidement autour de la cathode que de l'anode, et la quantité de cuivre y déposée est plus grande que celle que le liquide environnant en peut donner.

C'est ici la place de signaler aussi une création ingénieuse de Helmholtz, celle de la *couche double*, d'après laquelle la surface de contact de deux corps (d'un métal et du liquide dans lequel il est baigné) est recouverte d'une double couche d'électricité, composée de deux couches égales d'électricités contraires. On se rend compte de la sorte de la différence de potentiel produite par le contact, et aussi par le frottement de deux corps hétérogènes ; dans la pile, le siège principal de la force contre-électromotrice réside à la surface commune du métal attaqué et du liquide excitateur ; l'action chimique qui s'y développe devient la source de l'énergie disponible. La théorie n'explique pas bien comment cette couche double prend naissance et comment elle subsiste en circuit ouvert, mais l'hypothèse suffit pour jeter des clartés sur les phénomènes de

polarisation et sur les actions électrocapillaires où l'on voit la couche s'annuler et changer de signe.

En traçant ainsi, à larges coups de crayon, le tableau des principales adaptations aux faits de la théorie dualistique (1) des fluides, nous avons cherché à mettre en relief la part qui lui revient dans le développement de la science.

Les images dont cette théorie fait usage pour représenter les phénomènes ne sont, à tout prendre, que des images, dont la ressemblance n'est pas garantie. Les schémas de répartition de ces quantités + et —, qui s'étalent à la surface des conducteurs et s'accumulent sur les pointes ; qui polarisent le diélectrique dans sa profondeur ; qui se transportent d'un point à un autre des circuits métalliques, en obéissant aux forces électromotrices ; ces ions, qui flottent déjà dissociés dans les liquides conducteurs électrolysables et y subissent les attractions de la cathode et de l'anode, peuvent n'être que des fictions dénuées de réalité ; mais ce sont des fictions d'une belle simplicité, d'une claire limpidité, d'une prenante suggestivité, qui donnent l'illusion qu'elles font voir ce qui se passe derrière le tableau. Elles fournissent des facilités d'exposition incomparables, qui permettent d'établir d'abord une théorie élémentaire ouverte à tous les degrés d'intelligence et de culture ; de plus, elles nous

(1) Franklin avait proposé une théorie unitaire qui différait de celle-ci en ce qu'elle n'admettait qu'une substance électrique au lieu de deux : à l'état naturel tous les corps en renfermeraient une quantité déterminée, qui leur serait propre : tout moyen de leur en faire acquérir un excès le rend + ; ils deviennent — par défaut. Ainsi le frottement de deux corps l'un contre l'autre en fait passer une certaine portion de l'un à l'autre ; ce que l'un gagne est perdu par l'autre ; ils s'électrisent donc équivalement en signes contraires. Cette théorie est encore matérielle ; il y a plus : unitaire quant à l'espèce, elle est encore dualistique quant à la forme. Si plusieurs physiciens y sont revenus, c'est parce que l'électrisation leur paraissait plutôt l'effet d'une manière d'être dans l'hypothèse de Franklin que le résultat de la présence d'une substance déterminée.

mettent en possession d'une méthode de raisonnement et d'un instrument mathématique d'une grande puissance. On part d'un petit nombre de concepts et de définitions, et l'on en déduit, par la voie de syllogismes inattaquables et à l'aide de calculs, quelquefois difficiles, mais toujours précis, des solutions qu'une étude expérimentale minutieuse et prolongée reconnaît exactes pour la plupart. Les mesures de laboratoire confirment les résultats donnés par l'application des formules. La force de la méthode repose sur sa logique et sa précision, et elle s'est manifestée par sa fécondité.

Il n'existe pas d'agents plus efficaces de conviction. On comprend donc qu'on se soit attaché à ces théories qui donnaient satisfaction aux besoins actuels, qu'on en soit venu à oublier l'incertitude des prémisses sur lesquelles elles étaient fondées, et qu'on ait cru aux deux fluides, d'une foi sûre d'elle-même. D'ailleurs on sentait d'intuition que, si l'on errait sur des questions de forme, on touchait à la vérité par le fond. L'image n'était pas toujours virtuelle ; elle devenait souvent réelle.

Mais les théories ont été comparées à des tentes que l'on dresse le soir et qu'on replie le matin, pour continuer la route.

Les hypothèses empruntent une partie de leur séduction à leur nouveauté : on s'en fatigue à la longue. Elles n'expliquent d'ailleurs pas tous les faits, et on les trouve un jour en défaut.

Les deux fluides matériels ne constituaient qu'un ingénieux modèle, aux yeux des physiciens sceptiques et incrédules qui n'attachent aux hypothèses les plus fondées et aux théories les mieux assises qu'une valeur d'ordre et de commodité mnémonique. Des faits nombreux peuvent s'expliquer, disaient-ils non sans raison, par une hypothèse, sans que sa réalité s'ensuive nécessairement ; il faudrait qu'elle les expliquât tous.

Admettons même qu'il en soit ainsi ; il resterait encore à démontrer qu'aucune autre ne s'adapte aux faits observés. Ce qui est conséquent peut n'être pas vrai. Le succès d'une hypothèse n'est pas un garant de sa vérité. « La nature a plus de voies pour faire les choses que » nous n'en avons de les connaître » (1). Ces arguments, que nous reproduisons pour mémoire, ne touchaient pas plus directement la théorie substantielle de l'électricité qu'aucune autre du domaine de la physique et ne lui firent pas plus de mal. Elle souffrit davantage d'une orientation nouvelle des idées, qui marqua le milieu du XIX^e siècle.

C'est à cette époque que fut vidée une querelle qui durait depuis les premiers âges de la science. Dès l'origine de la philosophie grecque, le feu avait été considéré, par les uns, comme une matière, par les autres, comme un mode de mouvement, et les deux explications avaient été étendues à la lumière, qui est un des effets du feu. C'étaient deux thèses opposées, entre lesquelles les plus grands esprits s'étaient partagés, sans trouver l'argument décisif et vainqueur qui aurait pu mettre fin à la lutte. Au début du siècle, les deux écoles se dressaient encore en face l'une de l'autre, la première, celle des émissionnistes, se couvrant de la gloire de Newton, alors que la seconde ramenait tout à des ondulations, conformément aux vues de Descartes, de Huygens, de Hooke et d'Euler, aux lumières du génie de Young, de Fresnel, de Cauchy, de Hamilton, etc. Cette dernière apportait une explication immédiate et cohérente à tous les faits anciens et nouveaux, et les faisait entrer dans le cadre d'un harmonieux ensemble. Les émissionnistes, au contraire, dans les rangs desquels on voyait encore Malus,

(1) Ce propos est de l'abbé Cottin et je le rapporte d'après M. Boutroux, *loc. cit.*, page 10.

Poisson et Biot, en étaient réduits à accumuler tant d'hypothèses et celles-ci s'ajustaient si péniblement entre elles, que l'on finit par tomber dans le chaos. Les interférences et les diffractions fournissaient déjà des arguments invincibles contre les newtoniens et elles pouvaient être considérées comme la pierre de touche des deux théories rivales, lorsque Foucault réalisa une expérience située à leur point de croisement, qui tranchait définitivement la question (1). Cet *experimentum crucis* acheva de ruiner l'ancien édifice, déjà miné par la base, et la thèse de la manière d'être se substitua à celle de la substance en optique et en chaleur. Or, l'esprit humain lie toujours les choses voisines, et il se plaît à conclure par analogie : si la lumière et la chaleur ne sont pas une matière, l'électricité n'en est pas une non plus : elle ferait exception dans la nature ; rien n'autorise à l'admettre. Les fluides vitré et résineux, + et —, n'ont pas plus de réalité que les fluides austral et boréal, nord et sud, que l'on situait aux pôles des aimants, avant que le génie d'Ampère les en eût chassés : tous les fluides matériels doivent suivre le même chemin et subir le même sort.

Ces raisonnements par similitude étaient un puissant argument d'opinion ; la théorie mécanique de la chaleur leur donna une base plus solide.

Cette théorie, entrevue dès les premières années du siècle, venait seulement, vers 1850, d'être précisée dans ses contours par le génie des Carnot, Mayer, Joule, Colding, Helmholtz, Rankine, Hirn, etc. Étant donné que les phénomènes électriques sont toujours accompagnés de manifestations calorifiques, leur étude entraînait dans le cadre de la théorie nouvelle et cette

(1) « Samedi 27 avril, 1850, à une heure, il est constaté que la lumière va plus vite dans l'air que dans l'eau » ; note trouvée dans un carnet d'expériences de Léon Foucault.

étude permettait de pénétrer dans la nature intime des deux phénomènes inséparables et connexes. Il est impossible de résumer en quelques lignes des considérations qui remplissent plusieurs chapitres de la physique et s'appliquent à presque toutes les transformations de l'énergie en sa forme électrique. Mais nous pouvons montrer, par des exemples choisis, combien est étroit le lien qui rattache la théorie de l'électricité à celle de la chaleur, lorsqu'on part du point de vue mécanique, et quelles modifications en résultent nécessairement dans les anciennes manières de voir. Quand on frotte un bout d'ambre avec un morceau de drap, il peut paraître vraisemblable que l'on décompose leur fluide neutre en ses éléments positif et négatif ; il y a, par contre, de fortes et nombreuses raisons de croire que le frottement met ces corps dans un état particulier, auquel correspond un certain changement moléculaire (peut-être un mouvement vibratoire déterminé), qui se traduit à la fois en électricité et en chaleur ; en effet, l'ambre et le drap, le frotté et le frotteur, s'électrisent tous deux en même temps qu'ils s'échauffent et ils s'électrisent d'autant plus qu'ils s'échauffent moins, ce qui fait bien voir que les deux phénomènes ressortissent à une cause unique, l'énergie du frottement. Dans la chaîne fermée des métaux de Volta, il ne peut naître de force électromotrice, si tous les éléments sont et restent à une température uniforme et constante ; aucun transport d'électricité ne peut avoir lieu, car il se produirait un travail sans dépense équivalente, ce qui serait en contradiction avec le principe de la conservation de l'énergie. Les courants d'Ampère s'attirent ou se repoussent, mais ils ne conservent pas la même intensité pendant qu'ils agissent. Pourquoi ? La théorie des fluides ne peut nous le dire, mais la thermodynamique nous apprend que cet affaiblissement du courant est nécessaire, sinon l'on réaliserait encore le mouve-

ment perpétuel. Lord Kelvin et von Helmholtz ont déduit, nous n'avons qu'à le rappeler, les lois de l'induction du principe de la conservation de l'énergie : le principe de Lenz en est une expression. On constitue des génératrices d'électricité en faisant tourner un rotor dans un champ. La théorie des fluides imposait d'admettre, contre toute vraisemblance, que les flots d'électricité qui s'en écoulent sortaient des conducteurs ; ceux-ci auraient donc contenu des quantités inépuisables de fluide neutre. On considérerait maintenant l'électricité engendrée comme le fruit direct et le prix du travail dépensé pour entretenir la rotation de la machine, en surmontant ses résistances actives et passives. Ce travail devient encore électricité et chaleur : la perfection de la source consiste précisément à réduire au minimum le développement de chaleur. Telles qu'elles sont, ces machines sont par conséquent thermiques autant qu'électriques. Analogues à celles qui ont pour unique objet de transformer la chaleur d'un combustible en travail, elles transmutent aussi bien de l'énergie électrique en mécanique que réciproquement ; elles sont elles-mêmes réversibles. L'électricité nous apparaît dès lors comme une forme de l'énergie équivalente à de l'énergie calorifique, lumineuse ou autre, mais de qualité supérieure, car elle est, avec l'énergie mécanique, la forme la plus noble de l'énergie. Cette simple formule donne la clef de tous les phénomènes dans lesquels l'électricité se produit, se transforme et se transporte au loin. Finies les stériles discussions sur les deux fluides de Symmer ou le fluide unique de Franklin : ce sont des considérations énergétiques qui donnent la clef de l'énigme !

Mais il faut s'entendre sur le sens à donner aux mots. Une quantité d'électricité ne représente pas une quantité d'énergie par elle-même, pas plus que ne représente de travail un kilogramme d'eau renfermé dans

un bief d'amont, si l'on ne s'occupe pas de la position qu'il peut occuper en aval ; il faut multiplier ce kilogramme par la hauteur de chute possible, pour calculer le travail qu'il peut développer. En d'autres termes, la quantité d'électricité est un facteur d'énergie, le facteur qu'il faut multiplier par le facteur tension, pour obtenir une équivalence en travail. Il n'y a pas d'équivalent mécanique d'un coulomb, mais d'un coulomb-volt ou joule.

En adhérant à ces nouvelles manières de voir, on décréait de mort la théorie substantielle de l'électricité, liée au concept particulier des fluides.

Elle devait, du reste, subir une dernière et plus grave épreuve.

Une série de découvertes, qui allaient devenir sensationnelles, vinrent alors apporter un puissant concours au mouvement d'opinion que nous venons de retracer. L'ancienne théorie n'avait pas fait prévoir ces découvertes ; elle fut impuissante à les expliquer. Tel était le cas des phénomènes communs à la lumière et à l'électricité. L'observation, faite depuis longtemps, que les corps diaphanes sont d'ordinaire isolants et les corps opaques, conducteurs, fut une première indication ; elle révélait entre ces agents une parenté qui devait se montrer chaque jour plus étroite. Les phénomènes de Faraday et de Kerr, notamment la biréfringence produite dans le champ des puissants électro-aimants, et la polarisation rotatoire magnétique, puis l'augmentation de conductibilité du sélénium, engendrée par illumination, constituèrent des données de plus en plus positives, auxquelles s'ajouta bientôt la loi qui rattachait les pouvoirs inducteurs spécifiques des diélectriques à leurs indices de réfraction par une relation mathématique que l'expérience confirmait d'une manière remar-

quable (1). Voici alors que les vitesses de propagation mesurées par Weber et Kohlrausch se trouvèrent voisines de la vitesse connue de la lumière. Enfin, le génie de Maxwell lui fit découvrir, par l'examen de leurs équations de dimensions (2), que le rapport des unités électromagnétique et électrostatique de quantité était une vitesse ; il devina que cette vitesse était celle de la lumière, et la comparaison pratique de ces unités conduisit à une valeur voisine de 30 milliards ; or, la vitesse de la lumière est précisément de 30 milliards de centimètres !

De si nombreuses et si remarquables concordances ne pouvaient être le fruit du hasard, ni le résultat de coïncidences fortuites ; elles établissaient l'existence d'une liaison intime entre les phénomènes lumineux et électriques, d'une liaison tellement intime, qu'on se vit amené à les identifier. Interrogée sur la cause qui pouvait leur être commune, la théorie matérielle restait muette. En attendant qu'elle trouvât une réponse, on la pria de s'effacer.

Entretemps l'expansion des idées énergétiques coïncidait avec le plus merveilleux essor dans tous les domaines : on pouvait croire qu'il leur était dû.

La science de l'électricité était ainsi invinciblement aiguillée sur une voie nouvelle : nous allons l'y suivre.

(1) Cette loi, formulée par Maxwell, a pour expression $n^2 = K$; n est l'indice de réfraction des radiations lumineuses de grande longueur d'onde ; K est le pouvoir inducteur spécifique, c'est-à-dire la constante spécifique du diélectrique, égale à l'inverse du paramètre k de la formule de Coulomb, ainsi que nous l'avons déjà dit

(2) Les équations des formules de dimension représentent la relation qui rattache les unités dérivées aux trois unités fondamentales de longueur L , de masse M et de temps T ; elles font voir de quelle manière les phénomènes dépendent des éléments primordiaux et irréductibles d'espace, de matière et de temps.

Le rapport des deux unités de quantité est $\frac{L^{3/2} M^{3/2} T^{-1}}{L^{1/2} M^{1/2}} = \frac{L}{T}$; c'est donc bien une vitesse.

Il est intéressant de déterminer la date à laquelle s'est produite cette évolution des doctrines électriques. Nous la trouvons inscrite dans les écrits du milieu du siècle dernier.

Dans la 4^e édition de son *Traité élémentaire de Physique*, paru en 1847, Pécelet, professeur de physique à l'École Centrale des arts et manufactures, exposait encore l'hypothèse classique des deux fluides matériels, en disant qu'elle « satisfait complètement aux faits » observés » ; mais c'en était l'éloge funèbre, car, quelques pages plus loin, il émettait l'avis que « tout espace » est rempli d'un fluide électrique, qui ne peut être « que l'éther », et il estimait que cette nouvelle manière de concevoir l'électricité présentait « bien plus de probabilité ». Il rompait donc avec le concept des deux fluides *sui generis*, considérés comme entités spéciales et c'était déjà dans l'éther qu'il cherchait la cause des actions observées (1).

En 1852, A. de la Rive faisait un pas de plus. « Il » est bien probable, disait-il, que l'électricité, au lieu » de consister en un ou deux fluides spéciaux, n'est » que le résultat d'une modification particulière dans » l'état des corps, modification qui dépend de l'action » mutuelle qu'exercent les unes sur les autres les particules pondérables de la matière et le fluide subtil » qui les entoure de toutes parts, qu'on désigne sous le » le nom d'éther, et dont les ondulations constituent la » lumière et la chaleur » (2). L'électricité n'est conséquemment pas une chose; c'est un état, une manière d'être; ce n'est pas une substance, c'est un accident; un accident, dont la matière pondérable et l'éther impondérable sont le support.

(1) Pécelet, *Traité élémentaire de physique*; 4^e édition en 2 volumes (Paris, Hachette et C^{ie}, 1847), pages 68 et 81.

(2) A. de la Rive, *Traité d'électricité théorique et appliquée*, en 2 vol. (Paris, J. B. Baillièrè, 1854), page 16. La préface est datée de 1852.

Lamé développe la même idée en la généralisant dans les termes suivants : « Il n'est plus possible » d'arriver à une explication rationnelle et complète » des phénomènes de la nature physique, sans faire » intervenir l'éther ; on n'en saurait douter ; cette » intervention sagement conduite trouvera le secret » ou la véritable cause des effets que l'on attribue au » calorique, à l'électricité, au magnétisme, à l'attrac- » tion universelle et à la cohésion, aux attractions » chimiques, etc. » (1). La pensée directrice de Lamé était celle de l'unité, qui devait, dès ce moment, dominer toute la physique et la rénover, par l'application des principes de la thermodynamique et de l'énergétique.

C'est, en somme, vers ce but commun que conver-geaient alors les efforts de tous ; mais les idées qui devaient y conduire se heurtaient souvent. Ainsi Grove répudiait l'hypothèse des deux fluides et il abondait dans le sens de la manière d'être, mais il ne voulait pas en appeler à l'éther, par suite d'une aversion invincible pour ce qu'il désignait par le nom d' « entités subtiles ». Dans son bel ouvrage sur la corrélation des forces physiques (2), il déclarait que les phénomènes de la physique inorganique doivent être considérés « plutôt comme des affections ou des modifications de » la matière ordinaire que des entités spéciales sub- » stantielles par elles-mêmes ». Parlant plus particulière-ment de l'électricité, il disait plus loin : « J'ai passé » successivement en revue, toutes les classes connues » des phénomènes de l'électricité, et il n'est pas un » seul effet électrique où l'on ne puisse mettre en » évidence un changement moléculaire... ; à mesure

(1) Lamé, *Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides* (Paris, 1852).

(2) Grove, *Corrélation des forces physiques* ; traduction Moigno, sur la 3^e édition anglaise (Paris, Trambly, 1856), pages VIII, 124, etc. Seguin annota l'ouvrage en développant les mêmes idées sur les forces.

» qu'on suit de plus près l'idée d'un fluide hypothétique, on la voit s'évanouir de plus en plus, et se résoudre dans l'idée d'une force ou d'un mouvement...; les particules de la matière sont affectées par les forces de l'électricité et du magnétisme, d'une manière inconciliable avec l'hypothèse d'un fluide ». Seguin exprimait les mêmes manières de voir dans des notes jointes à la 3^e édition du livre de Grove, et Hirn les faisait siennes dans sa *Thermodynamique*.

Dans son bel ouvrage sur l'unité des forces physiques, publié en 1864 (1), le P. Secchi poursuit, lui aussi, l'objectif « d'enfermer dans une synthèse générale toutes les forces de la nature et de les réduire à un principe unique ». Il parle avec dédain de l'époque où l'on « admettait sans difficulté l'existence d'une demi-douzaine de fluides impondérables, qui étaient introduits à tout propos pour expliquer chaque fait particulier » ; il prend pitié des « forces métaphysiques », des entités qui ne sont « ni esprit, ni matière » de Grove, Seguin et Hirn et les traite de « nébulosités ». Pour lui, il place dans l'éther même le siège des modifications qui produisent les phénomènes électriques ; comme la chaleur et la lumière, l'électricité est une « simple modalité de mouvement » ; les attractions et les répulsions sont des effets d'une accumulation d'éther ; un courant électrique est un flux d'éther capable d'entraîner avec lui la matière pondérable, etc.

Une leçon d'ouverture d'un cours de physique expérimentale, professé au Collège de France par A. Bertin, leçon recueillie par la REVUE DES COURS SCIENTIFIQUES de la France et de l'étranger (2), nous

(1) Le P. Secchi a commencé de publier ses idées dès l'année 1858, dans le BULLETIN DE L'ACADÉMIE TIBERINE ; la première édition de l'*Unita delle forze fisiche* parut en 1865. Le D^r Delechamps en a donné une traduction faite avec le concours de l'auteur sur la seconde édition italienne (Paris Savy, 1874) ; nous lui empruntons nos citations.

(2) REVUE DES COURS SCIENTIFIQUES, 15 décembre 1866.

donne l'état de l'opinion relativement à la théorie matérielle en 1866 ; le professeur démontre que « de quelque manière qu'on torture la théorie » des deux fluides, on n'en peut rien tirer d'acceptable : la voilà donc condamnée sans appel. Pour Bertin il n'y a plus qu'un seul fluide, et ce fluide est l'éther : « la chaleur et la lumière seraient un effet de vibration, alors que l'électricité est un effet de masse ». Et le trop ingénieux physicien explique et développe sa pensée (elle avait besoin de l'être), avec une conviction digne d'un meilleur sort, car personne ne se souvient plus guère des ingénieuses élucubrations de Bertin et il n'a du reste rien survécu non plus des essais du P. Secchi, de Grove, de Seguin, de Lamé, de Hirn, d'Edlund, etc., voire même de ceux plus récents du P. Leray (1) et d'autres, soit qu'ils aient fait de l'électricité un élément dynamique agissant à distance, soit que plutôt (c'était la grande majorité) ils aient réduit les phénomènes à des mouvements ou bien même à des variations de tension des éléments de l'éther.

Ces dernières tentatives étaient les plus rationnelles, car on avait de multiples raisons de vouloir localiser dans l'éther l'énergie dont l'évolution détermine les actions électriques. Mais on entrait dans un monde inconnu et, pour l'explorer, il fallait une méthode prudente et patiente. Avant de se lancer dans des excursions hâtives, à travers un champ mal frayé, on aurait dû sonder longuement et étudier à fond le terrain sur lequel, on s'aventurait. Or, tous paraissent oublier qu'une théorie s'édifie comme un monument, pierre par pierre, et qu'on ne doit poser chacune

(1) P. A. Leray, *Essai sur la synthèse des forces physiques*, 1885. *Complément à l'essai*, 1892 (Paris, Gauthier-Villars) Le savant eudiste est revenu en partie au concept de la monade leibnizienne ; il admet que le monde est formé de trois sortes de matière : l'éon (fluide primordial), l'éther et la matière proprement dite ; il repousse toute action à distance et demande l'explication des phénomènes à des chocs des parties de la matière.

d'elles dans son logement qu'après avoir bien assujetti et maçonné celles sur lesquelles elle prendra son assise. Ils se laissaient d'autre part entraîner à proposer des hypothèses nouvelles, alors que la logique imposait au contraire de réduire le nombre de celles qu'ils conservaient nécessairement.

Ce n'est pas à dire que ces travaux n'aient pas eu leur utilité. On les justifierait suffisamment en rappelant que « la conjecture a toujours été l'embryon de la théorie ». « Toutes les sciences, disait aussi Fontenelle, » ont leur chimère, après laquelle elles courent sans » pouvoir l'atteindre ; mais, en chemin, elles attrapent » d'autres connaissances fort utiles ». Des résultats négatifs sont encore des résultats : en signalant que tel sentier aboutit à une impasse, on évite à ceux qui suivent de s'y engager.

Nous croyons pouvoir dire aujourd'hui que les physiciens du milieu du siècle ne faisaient qu'entrevoir le terme vers lequel il fallait tendre, sans bien se rendre compte de sa position exacte.

Tout le monde tombait d'accord sur un point, c'est que la théorie des fluides matériels (théorie unitaire aussi bien que dualistique) était irrémédiablement compromise, et qu'il importait de s'en affranchir ; mais on ne s'entendait plus sur la théorie qu'on lui substituerait.

On se ralliait avec ensemble autour de plusieurs grandes idées maîtresses, nous dirions volontiers autour de quelques idées centrales, fort élevées, séduisantes autant que suggestives, très larges, même trop larges. Les physiciens obéissaient avec ensemble à cette tendance « vers l'unité et la simplicité », dont Poincaré devait plus tard faire la loi des recherches. Ils se redisaient avec conviction le mot de Fresnel, que « si quelque chose doit révéler les secrets de la » constitution intérieure des corps, c'est l'étude appro-

» fondie des phénomènes de la lumière », et ils demandaient à l'Optique la méthode qui devait conduire l'Électricité au succès. L'éther électrique ne pouvait différer de celui des ondulations lumineuses, disaient-ils, car il était difficile d'admettre qu'il y en eût deux, se pénétrant l'un l'autre. Ils invoquaient de plus avec confiance les principes de l'Énergétique, qui dominent toutes les manifestations naturelles et contribuaient alors si puissamment à l'unification des doctrines théoriques et au splendide essor des applications dans tous les domaines de la science et de l'industrie. Tels étaient les mots d'ordre, qui devaient être entendus de tous et leur servir de mots de ralliement et de signaux pour orienter leurs pas dans une direction commune.

Mais il est plus aisé de démolir et de jeter bas une construction branlante que d'en édifier une nouvelle.

On avait largement décousu, il fallait recoudre : or, les morceaux dont on disposait étaient riches, mais leurs couleurs ne s'harmonisaient pas toujours.

En somme, la formule générale de l'Électricité-accident fournissait les éléments d'une brillante introduction et d'une belle entrée en matière ; mais, l'idée originelle étant énoncée, il s'agissait ensuite d'écrire et de développer les équations dans lesquelles s'incarneraient les thèses nouvelles ; les prémisses posées, il fallait en faire jaillir les réponses aux questions concrètes, qui se présentaient d'elles-mêmes. L'Électricité-accident est-elle une manière d'être de la matière pondérable ou bien de l'éther, ou de l'une et de l'autre ? Est-ce un mouvement périodique et rythmé ? Dans cette hypothèse, de quelle nature est ce mouvement ? Est-il aux trajectoires rectilignes ou circulaires ? Quelle explication donner en ce cas des phénomènes de l'électro-statique, et comment rédiger ce premier chapitre de l'électricité, qui la prend au repos et constitue la science de ce qu'on est convenu d'appeler l'électricité

de position ? Quelle idée se faire des champs, des lignes et des tubes de force ? On ne pouvait plus dire qu'une quantité localisée en un point était la cause des forces et le point d'application des forces ; ce n'était plus dans cette quantité qu'on devait chercher le siège des phénomènes, mais dans le milieu ambiant, dans l'éther vraisemblablement. Or, le mécanisme de ces actions était à découvrir ou à inventer. Que mettre à la place des mémoires classiques de Poisson et de lord Kelvin, relatifs à la distribution des quantités sur la surface des conducteurs, et, en particulier, que substituer aux calculs qui les avaient conduits à la détermination des actions de deux sphères conductrices, avec une précision qui avait été un des triomphes de l'ancienne théorie ? Que transporte enfin un courant dont l'intensité est définie par le passage d'une quantité déterminée dans l'unité de temps ? Ce n'étaient pas les seuls, mais c'étaient les premiers problèmes à résoudre, en s'inspirant des tendances qui prévalaient.

Pour nous rendre compte de la marche de la science dans cette voie, nous dépouillerons d'abord les œuvres didactiques, qui ont vu le jour à partir de la seconde moitié du siècle, et nous dresserons le bilan de ce qui a été réalisé dans ce laps de temps.

Il est difficile de se tirer des ornières d'un mauvais chemin dans lequel on s'est engagé ; ceux qui font la science subissent d'autre part les exigences de ceux qui la reçoivent. Ces derniers, pleins du souvenir de l'ancienne doctrine, qui avait nourri leur jeunesse, comparaient ses raisonnements simples et clairs, ses images lumineuses, ses calculs précis aux solutions vagues, diffuses, souvent peu cohérentes, proposées individuellement par les esprits dirigeants et ils se prenaient à regretter les bons vieux fluides. Les auteurs ont intérêt à donner satisfaction à leurs lecteurs, mais ils doivent plus encore chercher la vérité : *amicus*

Plato, sed magis amica veritas. Il s'agissait de faire des concessions aux habitudes et aux désirs des premiers, sans trahir l'autre. Ils furent donc amenés à conserver ce qu'on pourrait de la terminologie et des méthodes d'autrefois, tout en laissant entendre et lire entre les lignes que l'on était devenu sceptique pour le concept matériel de l'Électricité-substance, et qu'on ne croyait plus aux fluides, ni surtout à leurs actions à distance. C'était un double rôle, difficile à jouer. On évitait difficilement des inconséquences de langage : on s'en accusait humblement et l'on s'en excusait comme on pouvait. Le plus souvent on invoquait « la tyrannie des mots légués par le passé ». Grove subissait, comme les autres, « cet esclavage des idées par les mots » et il se plaignait ingénument de ce que, « pour exprimer une opinion différente des opinions reçues », il se voyait contraint de « se servir des mots qui impliquent les opinions reçues » (1). Le savant anglais plaidait la cause de tous en se couvrant de ces nécessités des mots, qui le dispensaient d'avouer le flottement et l'imprécision des idées dominantes et la situation hybride de la science, en cette époque de transition et en cet interrègne sans gouvernement obéi.

Les professeurs de l'enseignement secondaire étaient assurément ceux qui souffraient le plus de cet état de choses. La première question que leur posent leurs jeunes élèves — cet âge est sans pitié — est toujours celle-ci : « Maître, qu'est-ce que l'électricité ? » Le maître ne peut guère leur faire la réponse sentencieuse de Joseph Bertrand : on avoue à des hommes mûrs, on ne confie pas à des enfants — cela les amuserait trop — que l'on ignore le premier élément de la chose qu'on est chargé de leur enseigner. On ne peut non plus expliquer à des débutants pour quelles raisons on

(1) *Loc. cit.*, page 115

a perdu la foi aux fluides, attendu qu'il faudrait leur narrer l'histoire de la défaite des doctrines émissio-nistes, leur faire saisir la différence entre la substance et l'accident, les entretenir des formes et qualités de l'énergie et d'autres choses encore. Dans ces condi-tions, on est condamné à user de faux-fuyants et c'est ce qu'ont fait les auteurs les plus classiques du milieu du siècle.

La lecture des livres de Becquerel, Pouillet, Despretz, Deguin, Pinaud, Ganot, Boutet, de Monvel, Drion et Fernet, etc., donne lieu à cet égard à de curieuses et bien intéressantes observations. Pour quelques-uns d'entre eux, il n'y a rien de changé depuis Dufay et Symmer, et les deux fluides continuent d'être des entités, possédant tous les attributs de la substance ; on ne met pas en doute leur existence réelle, tout en les laissant dans une certaine pénombre. Les autres commencent, avec un souci croissant — le progrès de leur mentalité se manifeste dans leurs édi-tions successives — à substituer au mot suranné de fluide des circonlocutions moins compromettantes. Ainsi ils parleront d'« états électriques différents » ; ils annonceront qu'il y a « deux espèces d'électrisation » ; ils définiront la « quantité d'électrisation ». Mais ce sont des préoccupations oratoires d'exorde, et des artifices de première page ; dès la dixième page, les mots proscrits sont revenus sous la plume de l'écrivain, comme revient l'habitude, au galop, tant est fort cet esclavage dont gémissait Grove, et tant on trouvait surtout de motifs de maintenir les anciens errements ; on y per-sévérerait faute de mieux. C'est ce que confessaient ingénument Drion et Fernet, en s'excusant de paraître adhérer encore à la théorie des deux fluides : « à cette théorie, écrivaient-ils en 1861, on peut faire un grand nombre d'objections ; cependant c'est elle qu'admet-tent encore la plupart des physiciens français, à

cause de la facilité avec laquelle elle permet d'expliquer tous les résultats de l'expérience ou même d'en prévoir de nouveaux... et de grouper aisément des faits, qui conserveraient d'ailleurs toute leur valeur, alors même qu'une autre théorie paraîtrait plus tard devoir lui être substituée » (1).

On aurait pu croire que les Traités généraux destinés aux élèves des classes de Spéciales et aux auditeurs des cours de l'enseignement supérieur des Universités auraient suivi le progrès de plus près ; mais en consultant les ouvrages si justement estimés, parus avant 1900, de Verdet, Paul Desains, Jamin, Daguin, Boutan et d'Almeida, Brisse et André, Müller, Wüllner, Van Tricht, etc., on est obligé de constater que les mêmes causes ont produit les mêmes effets ; et l'on retrouve la même attitude vis-à-vis des fluides, pour ce qui est des choses comme des mots, dans les excellents Traités spéciaux de Joubert, puis de Mascart et Joubert, Gordon, Gariel, Pellat, Wiedemann, Eric Gérard, Joseph Bertrand, etc. Pour ne point se priver des avantages d'exposition que procure la théorie substantielle, on ne rompt pas avec elle ; mais on ne lui attribue d'autre rôle que celui d'un modeste et utile instrument de travail : on adhère aux principes proclamés par Faraday et par son école, et l'on en fait un centre commun autour duquel se grouperont les propriétés de l'électricité, considérée comme une manière d'être, et celles des milieux par lesquels ces propriétés se manifestent et se transmettent ; mais on ne réussit qu'à juxtaposer, on ne marie pas ces doctrines, et l'on tâtonne dans l'établissement d'une théorie d'ensemble. Ce n'est guère que dans les leçons de Vaschy, éditées en 1890 (2), que l'on trouve une ébauche d'un exposé

(1) Drion et Fernet, *Traité de physique élémentaire* (Paris, Masson et fils, 2^{me} édition, 1861) ; p. 358.

(2) Vaschy, *Traité d'Électricité et de Magnétisme* ; 2 vol. (Paris, Baudry et C^{ie}, 1890).

méthodique de la thèse de l'Électricité-accident. Cette théorie n'avait donc pas pris la forme didactique qui lui aurait été nécessaire pour évincer de l'enseignement et y supplanter celle de l'Électricité-matière; par suite, les vues nouvelles ne se sont pas vulgarisées et répandues dans le public. En 1860, l'ancien édifice s'était écroulé, a écrit Chwolson (1), et l'on travaillait au nouveau; mais celui-ci n'avait pas encore été rendu habitable, en 1890, lorsqu'on a renoncé à pousser plus loin sa construction. Il est et restera inachevé.

C'est dans les écrits de Faraday et surtout dans le célèbre *Traité d'Électricité* de Maxwell (2) que l'on croirait devoir trouver un exposé complet de cette électricité nouvelle; mais, ici encore l'on ne découvre pas ce que l'on cherchait. Faraday n'a fait que préparer les voies et déblayer le terrain; son continuateur a surtout consacré ses efforts à « réduire l'électromagnétisme à ne plus être qu'une science dynamique ». Il a développé les conceptions de Faraday, qui plaçait « l'origine des phénomènes dans des actions réelles » s'exerçant dans le milieu; mais son vaste esprit s'empare aussitôt du sujet et l'élargit tellement qu'on a peine à le suivre. Le *Traité* est d'une étude ingrate: « la première fois, a dit H. Poincaré (3), qu'un lecteur » français ouvre ce livre, un sentiment de malaise et » souvent même de défiance se mêle d'abord à son » admiration ». Et il ajoutait: « le savant anglais ne » cherche pas à construire un édifice unique, définitif » et bien ordonné; il semble plutôt qu'il élève un » grand nombre de constructions provisoires et indé-

(1) Chwolson, *op. cit.*: Tome IV, page 12.

(2) La première édition de *A treatise on Electricity and Magnetism* a paru à Oxford en 1873. La traduction française de M. Seligmann a été faite d'après une deuxième édition, de 1881, publiée après la mort de l'auteur, et imprimée en 1885 (Paris. Gauthier-Villars, 1885); Cornu, Potier et Sarrau y ont ajouté des Notes et Éclaircissements.

(3) H. Poincaré, *Électricité et optique*, préface.

» pendantes, entre lesquelles les communications sont
» difficiles et quelquefois impossibles ». Le grand
maître français a pris son parti du système des con-
structions indépendantes, et il a cherché à faciliter les
communications entre elles, autant que faire se pou-
vait, dans ses cours de la Sorbonne de 1888 et 1889.
Ses admirables leçons, publiées en 1891, sont une des
plus belles œuvres de physique de l'incomparable pro-
fesseur (1). C'est dans ce livre qu'il faut suivre les
idées de Maxwell; si on veut les comprendre, en
pénétrer la profondeur, sous leur apparente incohé-
rence, en découvrir les liaisons et se les assimiler.
Pierre Duhem se consacrait à la même étude, en
1900 (2), et la poursuivait avec la pénétration qui lui
était habituelle; mais il présentait l'œuvre du savant
anglais avec moins de bienveillance que Poincaré et
en livrant carrière à son esprit critique; il y relevait
« des disparitions de termes gênants », des « transfor-
» mations de sens d'une lettre », qui permettaient de
franchir sans trop d'encombre des pas dangereux :
s'il ne va pas jusqu'à accepter la qualification de
« coup de pouce » — *venia sit verbo!* — il rappelle que
Maxwell a reconnu lui-même, dans la préface de son
Traité, qu'il avait fait souvent « l'office d'avocat, plutôt
que de juge » (3) de ses explications. Mais n'avons nous
pas tous plaidé *pro domo*? La discussion prend quel-
quefois un ton acerbe et passionné dans Duhem; ses
conclusions restent néanmoins toujours justes, nous

(1) Ces leçons forment la substance de l'ouvrage déjà cité ci-dessus, *Élec-
tricité et optique*, portant en sous-titre de la première partie : *les théories de
Maxwell*, et de la troisième partie : *les théories de Hertz et de Lorentz*. Je
cite d'après la deuxième édition de 1901, en un volume (Paris, Carré et Naud).

(2) Ce remarquable travail a paru en 1902, dans les tomes XXIV et XXV des
ANNALES DE LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE DE BRUXELLES, sous le titre : *Les
théories électriques*, de J. Clerck Maxwell; pages 239, 17 et 293; il a été
réimprimé plus tard en un volume séparé.

(3) Maxwell, *Traité d'Électricité*, traduction française, préface, page XV.

nous reprocherions de ne pas le reconnaître et de ne pas le dire hautement.

Hertz était privat docent à l'École Technique de Karlsruhe, lorsqu'il commença, en 1884, à développer les idées du génial maître de Cambridge, auquel il devait associer son nom, en complétant d'abord son œuvre théorique, puis en lui apportant une merveilleuse confirmation expérimentale.

En somme, c'est dans les écrits de Faraday, de Maxwell et de Hertz qu'il faut chercher les grandes lignes originales de la théorie fondée sur la thèse de l'Électricité considérée comme une manière d'être.

Faraday n'était pas mathématicien : Maxwell a traduit analytiquement ses idées et ses images. Il a remplacé la notion un peu vague du nombre de lignes et de tubes de force par celle plus précise du flux d'induction à travers une surface, l'induction étant une grandeur dirigée proportionnelle au champ, affectée d'un coefficient variable selon la nature du champ. La charge présente à l'intérieur d'une surface fermée n'a d'autre définition, dans Maxwell, que celle, toute mathématique, d'une grandeur proportionnelle au flux d'induction qui sort de cette surface. Les diélectriques jouent un rôle prépondérant dans ses théories. Il établit des relations qui lui font retrouver les lois de l'induction et de l'électro-dynamique ; puis il pose ses six équations célèbres du champ électrique et du champ magnétique (1). Hertz s'attachera davantage à ces équations qu'aux calculs sur lesquels elles s'appuient et à leur commentaire, qu'il qualifie

(1) Les équations du champ électrique donnent les composantes du courant, rapportées à l'unité de surface, en fonction des composantes X, Y et Z de la force magnétique ; les équations du champ magnétique expriment les produits μ_x , μ_y et μ_z (μ étant le coefficient de perméabilité) en fonction des composantes de la force électro-motrice d'induction. Il n'y a que ces dernières qui ne soient pas expérimentalement définies.

d'obscur (1) : « Ce qu'il y a d'essentiel dans les théories de Maxwell, dira-t-il, ce sont les équations de Maxwell. » Il prendra pour tâche de construire une théorie conduisant à ces équations finales posées d'avance et accommodées à ses vues. Poincaré a rendu hommage à cette œuvre remarquable, « parfaitement cohérente, » écrit-il, et en accord avec le principe de la conservation de l'électricité et du magnétisme, et avec celui de l'égalité de l'action et de la réaction ». Il est à remarquer que Maxwell et Hertz ont expliqué l'ensemble des phénomènes, sans faire appel à aucune hypothèse particulière sur une manière d'être déterminée de l'électricité plutôt que sur une autre.

Nous allons essayer de faire apparaître, dans leurs grandes lignes, les théories des trois maîtres.

On a l'habitude de commencer cette étude par celle de l'électrostatique ; nous nous conformerons à cette tradition, qui s'appuie sur l'exemple des meilleurs traités ; il est rationnel en tous cas de considérer les choses au repos, avant de se demander ce qu'il advient d'elles, lorsqu'elles sont mises en mouvement.

Les difficultés d'exposition que nous rencontrerons sont déjà tellement grandes, qu'il faut nous garder de les aggraver.

Poincaré a raconté qu'un des savants français « qui a le plus approfondi l'œuvre de Maxwell » (il ne l'a pas désigné autrement), lui disait, en un jour de confiance : « je comprends tout dans son livre, excepté ce

(1) Hertz était né à Hambourg, en 1857. Une de ses premières études, intitulée *Relations entre les équations fondamentales de l'Électro-dynamique de Maxwell et celles de l'Électro-dynamique ordinaire*, parut en 1884, dans le Tome XXIII des WIEDEMANN'S ANNALEN ; un second mémoire sur ces équations fondamentales fut publié dans les mêmes Annales, en 1890. Mais les deux principaux mémoires du savant allemand sont ceux de 1892 : *Sur les équations fondamentales de l'électro-dynamique des corps en repos, puis des corps en mouvement* ; Poincaré les a longuement analysés et grandement loués. Hertz est mort en 1893 ; il n'avait que 36 ans.

qu'est une boule électrisée ». Ce savant regrettait évidemment, sans oser se l'avouer, la vieille, bonne et commode image dualistique des fluides + et — ; elle laissait si bien croire que l'on voyait ce qui se passe sur la boule et autour d'elle. On le voit moins aisément dans l'hypothèse de l'électricité-accident, avec laquelle l'esprit ne s'apprivoise que lentement, tout en y mettant la meilleure volonté du monde. Nous avons tellement pris l'habitude de dire « l'électricité », comme nous disons le fer, le soufre, l'oxygène, qu'il nous est difficile de n'y plus voir qu'un être de raison ; il nous en coûte de lui refuser une existence propre et indépendante, et nous oublions que nous ne connaissons la chose qu'au titre de propriété passagère.

Faraday nous demande le sacrifice des idées que nous pouvions avoir sur l'électricité.

Avant lui, on revêtait les conducteurs d'une couche continue de fluides, auxquels on attribuait une densité ou une épaisseur variable et l'on en faisait émaner des forces ; illusion et convention ! Les forces seules ont une existence ; ce sont donc ces forces qu'il faut prendre pour point de départ de nos raisonnements. Faraday renverse par conséquent les termes de la proposition admise jusque-là : au lieu de considérer les forces comme des effets de l'électricité, il en fait ses causes et il les suit dans les lignes de force du champ. On a dit qu'il transporta ainsi le centre de gravité des phénomènes dans les champs d'action des forces, ce qui est exact et bien dit.

Toute l'attention du physicien se concentrait dès lors sur ces champs. Ils sont constitués par le milieu qui les remplit, éther et diélectrique ; ce milieu ne joue plus un rôle secondaire, on lui donne le rôle principal :

ce rôle n'est plus passif, il est actif. Telle est l'œuvre de Faraday (1).

On est accoutumé de dire que, dans l'hypothèse de la matérialité et sous l'empire de la théorie dualistique, on n'avait pas tenu compte du milieu : il ne faudrait pas admettre les yeux fermés cette opinion. Poisson d'abord, dès 1827, et d'autres, moins connus, avaient fait état, dans leurs théories, de l'augmentation de capacité due à l'interposition d'un diélectrique entre ses armatures, et Cavendish (2) s'était livré bien avant avec succès à des mesures des pouvoirs inducteurs. Il était de notion courante que les actions électriques exercées entre des quantités variaient avec la nature du diélectrique interposé, et la formule de Coulomb permettait de calculer ces forces en donnant au paramètre k de la formule $f = k \frac{QQ'}{r^2}$ une valeur égale à l'inverse de celle du pouvoir inducteur K (3). L'influence de la nature des milieux n'était donc ni inconnue, ni méconnue : on peut seulement dire qu'on ne lui accordait pas toute l'importance qu'elle méritait et qu'on s'en faisait une idée incomplète.

C'est une autre exagération de prétendre que la théorie substantielle impliquait absolument la notion d'une action instantanée à distance et que, de ce seul chef, elle était irrémédiablement condamnée à dis-

(1) Le premier travail de Faraday sur la question me paraît être le mémoire qu'il lut en 1838, à la Société Royale de Londres, sous le titre de *Nature of the electric force or forces*; ses autres études ont paru dans ses *Experimental Researches*, dont la publication commença en 1839 et ne se termina qu'après sa mort, survenue en 1867.

(2) C'est Maxwell qui a édité, en 1879, ces travaux de Cavendish, qui remontaient à l'année 1771; Faraday les avait continués, en se servant de son condensateur sphérique.

(3) Deux charges d'un micro-coulomb mises en présence à la distance d'un centimètre, s'attirent ou se repoussent avec une force de 9171 grammes dans l'air, de 4168 grammes dans le pétrole et de 2058 grammes dans l'huile de ricin; les différences sont moins marquées évidemment, mais encore sensibles, dans des gaz de diverse nature.

paraître. Pas plus que ne l'avait fait Newton pour les forces centrales, causes de l'attraction universelle, les électriciens du début du XIX^e siècle ne considéraient les forces électriques comme des phénomènes primordiaux et élémentaires. Coulomb faisait à cet égard, dans son célèbre Mémoire de l'Académie des Sciences, de 1788, une déclaration décisive : « Je pré-
» viens, disait-il, pour mettre la théorie à l'abri de
» toute dispute systématique, que je n'ai pas d'autre
» intention que de présenter avec le moins d'éléments
» possible les résultats du calcul et de l'expérience,
» et non d'indiquer les véritables causes de l'électri-
» cité. » Et Ampère, dans son *Introduction au mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques*, n'était pas moins catégorique, car il déclarait n'avoir fait aucune recherche sur la cause même qu'on pouvait assigner aux forces dont il avait constaté les effets, et il ajoutait qu'il évitait de parler des idées qu'il pouvait avoir sur la nature de cette cause. Ces maîtres éminents admettaient donc que ce pouvaient être des phénomènes composés exigeant eux-mêmes une explication. Cette explication, ils ne la cherchaient pas ; c'était de leur part un parti pris : ils en laissaient le souci à ceux qui les suivraient dans les chemins de la science. En admettant que ces actions s'exerçaient sans intermédiaire dans l'espace et sans intervalle dans le temps, ils s'en tenaient aux premières apparences et à la surface des choses ; mais leurs théories n'étaient pas plus compromises par ces réticences que ne l'est la mécanique céleste, qui parle aussi d'effets à distance, *comme si* ils se produisaient réellement, et qui ne tient pas compte de la vitesse de propagation de ces actions.

Faraday est ici un novateur. Il estime que, par le fait qu'il cesse de croire au *substratum*, doué d'attraction, pour adhérer à l'hypothèse de l'électrisation acci-

dentelle, il est obligé de s'occuper du mode et de la durée de la transmission des actions et qu'il lui est interdit de s'en tenir uniquement aux apparences. Des phénomènes qui consistent en des modalités, produites à un moment donné, naissent avec elles et se transmettent par quelque chose ; on doit suivre leur progression dans le temps et dans l'espace. Ils ne peuvent être sans être quelque part. Faraday dit qu'ils sont dans le milieu entourant les corps électrisés, dans ce qu'il appelle le fluide inducteur, et il les y localise.

Il faut prêter à ce milieu les qualités nécessaires. Cherchons dans ses *Experimental Researches* l'idée qu'il s'en fait. Après avoir déclaré que les effets constatés dans les champs ne peuvent être « simplement des attractions et des répulsions à distance », il émet l'avis que « une telle action pourrait être une fonction de l'éther ». De quelle manière ? Obligé de préciser, il imagine une théorie des diélectriques, reprise d'une comparaison faite par Coulomb, dans son Mémoire de l'Académie des Sciences, de 1789, entre les phénomènes d'influence dans le fer doux et dans les isolants. « A présent, écrit-il, je crois que l'induction ordinaire » (lisez l'influence) est une action de particules conti-
» guës, consistant en une sorte de polarité, au lieu
» d'être une action de particules ou de masses à des
» distances sensibles ; et, si cela est exact, l'établisse-
» ment d'une telle vérité doit être de la plus grande
» importance pour les progrès ultérieurs des recherches
» sur la nature des forces électriques ». Il comparait donc les éléments diélectriques à une série de petits conducteurs isolés, noyés dans un milieu isolant, leur servant de support et de ciment ou du moins de liaison, Ces particules possédaient à leurs extrémités, non plus des quantités de signe contraire, mais des qualités opposées. La description, calquée sur les conceptions magnétiques, reste au demeurant assez imprécise, mais

l'idée n'est que subsidiaire : la nouveauté des vues réside dans l'intervention du diélectrique.

Les forces électriques se transmettent de proche en proche par ce milieu ; les éléments qui sont intéressés les premiers, ce sont les plus proches ; l'action n'atteint que progressivement les points éloignés. Une modification dans l'état électrique survenant en un point et à un instant déterminés, tous les points du champ n'obéissent pas instantanément à cette variation ; ils en sont affectés avec un retard d'autant plus marqué que la distance est plus grande. L'effet conséquent se transmet dans le champ avec une vitesse, qui dépend de la nature et des conditions du milieu formant le champ. Avec une sûreté d'intuition qu'on ne saurait assez admirer, Faraday avait compris que cette question était capitale et il avait formé le projet de mesurer cette vitesse ; il ne put le mettre à exécution ; mais il avait fondé une école, qui allait poursuivre l'œuvre commencée.

En 1845, une société scientifique italienne mit au concours la question suivante : « Donner une théorie » physico-mathématique de la distribution de l'électricité sur les conducteurs de diverse forme, en partant » des idées de Faraday sur l'induction électrostatique » ; ce fut l'occasion d'une importante étude de Mossotti. Vers le même temps, W. Thomson (plus tard lord Kelvin), puis Clausius et Helmholtz développèrent l'idée faradique et introduisirent le concept de l'intensité de polarisation, grandeur dirigée, relative à chaque point du diélectrique, analogue à l'intensité d'aimantation (1).

Mais c'est surtout Maxwell qui a achevé l'image

(1) L'intensité d'aimantation se définit ainsi : portons sur l'axe magnétique de l'aimant une longueur égale au quotient de son moment par son volume, et nous obtenons l'intensité en un point de cet élément de volume ; cette définition s'applique à l'intensité de polarisation.

ébauchée par Faraday ; il en a précisé les détails et lui a donné une forme mathématique, avec l'originalité, l'indépendance, voire même quelquefois le manque de suite que nous avons déjà reconnus dans sa méthode (1), mais en y prodiguant ses géniales intuitions. L'ensemble est touffu, surtout si on le dépouille des formules : il est néanmoins possible d'en présenter une vue générale.

Le principe est posé. Les actions électriques se transmettent par l'intermédiaire des éléments du milieu diélectrique, composé d'éther et de matière pondérable ; on appliquera à ce milieu les lois de la mécanique rationnelle. Il y a lieu de croire qu'il n'existe qu'une différence quantitative entre l'éther et la matière qui est imprégnée de lui. Que se passe-t-il dans l'éther ? Nous ne saurions le dire, car nous ne savons pas grand-chose de lui : nous augurons de quelques-unes de ses propriétés par des effets constatés, que nous leur attribuons ; rien de plus. Les éléments du diélectrique communiquent les actions en les subissant eux-mêmes. La matière pondérable est seule à dénoncer par des caractères sensibles les modifications dont elle est le sujet : ceux-ci consistent dans une altération des formes et des états correspondants ; les plus caractéristiques sont une variation de volume et des changements dans les propriétés optiques, dont quelques-uns étaient anciennement connus. Ainsi le volume d'une bouteille de Leyde augmente, quand on la charge ; c'est le diélectrique verre qui se modifie moléculairement ; un tube de verre, sur la paroi interne et externe duquel on a collé une bande d'étain, s'allonge lorsqu'on l'électrise. Kerr a découvert deux ordres de phénomènes, qui portent son nom : un isolant solide ou liquide soumis

(1) Duhem a cru démêler dans l'œuvre de Maxwell trois électrostatiques distinctes, inconciliables sur quelques points.

à l'électrisation, devient biréfringent donc anisotrope, lentement, s'il est solide, presque instantanément, s'il est liquide ; d'autre part, si l'on fait réfléchir un rayon de lumière polarisée sur le pôle d'un électro-aimant, on observe que le plan de polarisation tourne en sens inverse de la direction du courant magnétisant. On désigne sous le nom d'*électrostriction* et de *magnétostriction* ces changements de dimensions et d'état qu'éprouvent les corps diélectriques et magnétiques sous l'influence d'un champ électrique ou magnétique ; ils ne se produisent pas soudainement et ne se dissipent pas immédiatement ; des manifestations thermiques les accompagnent fréquemment.

Maxwell accommode à ses vues l'hypothèse de la polarisation en imaginant un *déplacement* général de l'électrisation dans une direction déterminée, ayant pour effet de fournir des pôles aux molécules individuelles, en ne donnant de signes d'électricité que sur les surfaces terminales du diélectrique (1). Voici comment peut s'entendre le déplacement dont il est question. On considère un cylindre diélectrique comme formé par la superposition de deux cylindres uniformément électrisés, l'un d'une électrisation positive, l'autre d'une électrisation négative, équivalentes : sous l'action du champ, ces cylindres glissent l'un sur l'autre, parallèlement à la direction du champ.

Il semble que les idées de Maxwell se soient modifiées assez vite sur cette question, par le désir de se

(1) Maxwell dit qu'il y a *déplacement électrique*, lorsqu'une molécule du diélectrique (fluide éthéré et matériel) est dérangée de sa position normale d'équilibre ; ce nouvel état d'équilibre est figuré par un vecteur, dont on représente les composantes par f , g et h . Si le champ varie, le déplacement varie en même temps, et il résulte de cette variation du déplacement le phénomène que le maître anglais appelle un *courant de déplacement*, qui joue un si grand rôle dans ses théories. Les composantes de ce courant, $\frac{df}{dt}$, $\frac{dg}{dt}$ et $\frac{dh}{dt}$ sont les dérivées par rapport au temps des composantes du déplacement.

libérer plus entièrement de ce qui restait du concept matériel des deux électricités. Conformément à la méthode anglo-saxonne, il a conçu alors un modèle compliqué de champ, duquel Henri Poincaré a dit « qu'on aurait cru lire la description d'une usine, avec » des engrenages, des bielles, transmettant le mouvement et fléchissant sous l'effort des régulateurs à » boules et des courroies » ; mais il abandonna bientôt aussi cette « théorie saugrenue » (c'est Poincaré qui parle) (1), qui ne figure plus dans l'édition de ses œuvres complètes (2).

L'image à laquelle il s'arrêtera définitivement est sans doute plus voisine de la réalité, car elle offre même un certain caractère de vraisemblance.

« Il existe, dit-il, dans chaque partie du diélectrique » une tension mécanique, analogue à celle d'une corde, » dans la direction des lignes de force, et d'une pression dans les directions normales ». L'idée avait déjà été énoncée par Faraday. Au lieu d'une corde, considérons plutôt un faisceau de fibres élastiques, en caoutchouc, par exemple, et supposons-les soumises à une tension axiale, longitudinale, coïncidant avec la direction des forces du champ ; cette tension se traduit par un accroissement de longueur et celui-ci entraîne une variation de section, donc une variation de pression transversale. Ces fibres représentent les lignes de force du champ. L'élève de Faraday en a ainsi fort pratiquement matérialisé les éléments ; il nous les fait voir

(1) H. Poincaré, *La théorie de Maxwell* ; Collection SCIENTIA ; (Paris, Gauthier-Villars) ; p. 8.

(2) En un autre point de son *Traité d'Électricité et de Magnétisme* (t. I, p. 518). Maxwell donne un autre « exemple mécanique pour faire comprendre les propriétés des diélectriques », pour lequel il fait emploi de deux tubes en U reliés par leurs extrémités supérieures, remplis de mercure et d'eau ; un piston glisse dans la connexion horizontale des branches extérieures : son mouvement figure les charges et les décharges et la pression qu'il développe correspond à la force électromotrice.

des yeux et toucher des doigts ; ce ne sont plus, comme auparavant, de simples et purs objets géométriques, ils prennent une réalité physique.

On peut poursuivre l'image jusque dans ses détails les plus précis. Les tubes de tension traversent librement le diélectrique et s'y déplacent en tous sens sans y rencontrer de résistance : dans la pensée de Maxwell, le diélectrique isolant nous apparaît dès lors comme conduisant les tensions électrostatiques, alors que les conducteurs métalliques ne les conduisent pas ; on prend ainsi le contrepied de l'ancienne manière de voir où les phénomènes se développaient dans les conducteurs. Les tubes se terminent nécessairement tous à la surface d'un conducteur ; ils ne peuvent s'en détacher et pourtant ils s'y déplacent avec une mobilité parfaite. Un tube ne peut être en repos que si la tangente en son extrémité est normale à la surface du conducteur, et si toutes les pressions transversales, qu'il subit de la part des tubes voisins, se font mutuellement équilibre.

Maxwell a aussi fait usage de l'hypothèse d'une infinité de petits ressorts tendus, par lesquels il figurait commodément l'élasticité du milieu ; ces ressorts reviennent à leur forme première, dès que s'annule la force extérieure qui les en a écartés.

Quelle que soit la représentation à laquelle son esprit fécond donne momentanément la préférence, Maxwell suppose toujours que la force électrique, agissant au sein du diélectrique, le place dans un certain état de *contrainte* (1), duquel il tend spontanément à se délivrer, en développant une certaine énergie, qui résulte de ce que le milieu élastique a été dérangé de sa position normale. Le travail consommé pour déterminer cet état contraint est emmagasiné à l'état potentiel dans

(1) Le mot anglais de *strain* exprime à la fois un état de tension et un état de gêne imposé par une force ; cela correspond bien à l'idée de contrainte

la masse du milieu, sous forme d'énergie élastique, en quantité déterminée par unité de volume : que la contrainte cesse et l'on récupère l'énergie qui a tendu les fibres et bandé les ressorts. La disparition de l'état électrique est toujours ainsi accompagnée de l'apparition d'une quantité équivalente d'énergie calorifique, lumineuse, sonore ou autre.

Par voie de réciprocité, a fait observer Vaschy (1), on pouvait prévoir que des efforts mécaniques exercés sur le diélectrique développeraient en certains cas un champ électrique ; ce cas s'est réalisé dans le phénomène de piézo-électricité, présenté par un prisme de tourmaline, terminé par deux bases taillées perpendiculairement à l'axe du cristal ; ces bases deviennent positives et négatives, par l'effet d'une pression longitudinale.

En tout cela, l'énergie élastique résulte de ce que le milieu est dérangé de sa position d'équilibre normal ; mais le phénomène présente, dans l'espèce, un caractère spécial, qui le différencie de ceux que nous sommes habitués à envisager. En effet, l'énergie potentielle emmagasinée dépend d'ordinaire des positions relatives des molécules et non pas de leur position absolue, de sorte qu'il ne se produit aucune réaction, lorsqu'un corps se déplace sans se déformer. Ici au contraire (nous voulons dire dans le milieu, faisant fonction de fluide inducteur), tout se passe comme si chacune des molécules de ce fluide était sollicitée proportionnellement à sa distance de la position d'équilibre. Il ressortirait de là que si l'on donnait à toutes les molécules un même mouvement de translation, sans changement dans leurs situations relatives, l'élasticité n'en devrait pas moins entrer en jeu (2).

(1) Vaschy, *loc. cit.*, t. I, p. 107.

(2) H. Poincaré. — *Électricité et Optique*, pp. 28 et 73. Poincaré ne dissimule pas que ce concept particulier de l'élasticité rompt avec nos habitudes d'esprit et les hypothèses dominantes ; il fait observer du reste que le maître anglais n'y est pas toujours resté fidèle.

Nous allons voir maintenant comment ces hypothèses se concilient avec les lois expérimentales de l'influence et de la distribution électrostatique. Mais avant de nous engager dans cette étude, il nous faut constater encore que la théorie du potentiel, basée sur la loi de Coulomb et sur les propriétés des forces centrales, sans faire état de la cause des actions, est conservée intégralement dans la nouvelle manière de voir. Toutefois elle s'éclaire d'un jour particulier. Le champ, créé autour d'un corps électrisé par le rayonnement des lignes de force qui en émanent comme d'un centre, ne procède pas du corps, mais de l'ambiant. En chacun des points de celui-ci, il y a un potentiel ; ce potentiel est dans cet ambiant, éther et diélectrique. C'est l'expression du travail consommé dans la contrainte du diélectrique ; il correspond à une provision d'énergie potentielle, susceptible d'actualisation. La différence de potentiel, qui existe entre les extrémités d'un tube de force, réunissant la surface de deux conducteurs de signe contraire, prend la signification d'une force électromotrice ; elle produit un flux d'induction constant le long du tube. La capacité d'un conducteur unique ne dépend plus seulement de sa forme, mais encore de la nature du milieu ambiant. Nous ne multiplierons pas davantage ces remarques, laissant au lecteur le plaisir de suppléer par son savoir à ce que nous ne disons pas.

Prenons un champ créé par un conducteur électrisé et introduisons-y d'autres conducteurs neutres ; ils s'électrisent par influence : c'est la conséquence de l'état du milieu. Sous la double action de leur tension longitudinale et des pressions qui s'exercent latéralement entre eux, et par l'effet de leur mobilité, les tubes prennent une forme et une position déterminées et ils donnent au champ la nouvelle configuration que requiert l'équilibre. Les tubes cherchent leur point d'appui sur la surface des conducteurs en présence et

s'y implantent normalement ; l'état électrique de ceux-ci est + sur une base, — sur l'autre. Ce qu'on disait être la charge superficielle des conducteurs n'est plus qu'une fiction, que l'esprit place géométriquement aux bases extrêmes des tubes : plus la tension est grande dans les tubes, plus on voyait d'électricité sur les bases.

La quantité se définit par la grandeur de cette tension, laquelle s'exprime pratiquement par un nombre de tubes-unités ; un accroissement d'électrisation correspond à une augmentation de ce nombre. Si l'on convient de représenter chaque tube-unité par une ligne de force, la tension se mesure par un nombre de lignes.

C'est la tendance au raccourcissement des tubes qui détermine le rapprochement des bases découpées à la surface des conducteurs, et provoque l'attraction entre ces conducteurs. La constitution du champ permet de calculer rigoureusement la valeur de cette attraction entre des conducteurs de forme et de position déterminées, sans plus ni moins de difficultés que par l'ancienne théorie substantielle ; d'autre part, le diagramme du champ, interprété et compris à la façon nouvelle, fournit une image d'un saisissant réalisme. Entre ces surfaces de conducteurs, aux électrisations de signe contraire, on croit voir dans ces paquets de lignes, qui vont directement de l'un à l'autre, par le chemin le plus court toléré par les pressions latérales, des tentacules portés par l'un, allant chercher l'autre, s'y agrippant et le tirant à eux, avec d'autant plus de force qu'ils sont plus nombreux, plus drus et plus tendus. Amenons au contraire en présence deux conducteurs électrisés au même signe. Le diagramme fait voir maintenant une disposition divergente des tubes qui met en jeu leur répulsion latérale ; cette action transversale donne le sentiment de la force, qui éloigne

les conducteurs l'un de l'autre, car on dirait que de longs bras s'arc-boutent les uns contre les autres, et l'on se rappelle comment, à certains jours de grande affluence, il a fallu jouer des coudes pour se donner de l'air.

Revenons aux conducteurs, de signe contraire, qui s'attirent à travers le diélectrique. Si l'on surmonte la force qui tend à les rapprocher, et qu'on les éloigne l'un de l'autre, on étire et on allonge les tubes ; il faut pour cela une dépense de travail qui fait croître la différence de potentiel entre les conducteurs, en prenant la forme d'énergie électrique ; vient-on pour lors à laisser les conducteurs libres d'obéir à la tension des tubes, l'énergie emmagasinée dans le milieu est restituée sous forme d'énergie mécanique et les potentiels reprennent leur valeur initiale.

Poursuivons le développement de ces idées et appliquons-les aux opérations qui font acquérir l'électrisation aux corps, soit au bâton d'ambre frotté par le pan de la robe de Thalès de Milet. L'état électrique développé est le prix de l'énergie dépensée par la main qui frotte ; qu'est-ce qui acquiert des propriétés nouvelles ? Est-ce immédiatement l'ambre et la laine ? Nullement, c'est l'éther d'abord dans lequel ils baignent tous deux. La cause prochaine du phénomène sensible n'est donc plus à chercher dans les corps tenus en main et mis en contact intime par friction, mais c'est dans le milieu qui les environne. Quand on dit qu'ambre et laine sont électrisés, on exprime que l'ambre et la laine nous manifestent ce qui s'est produit dans le milieu. Si l'on veut être entièrement logique et absolument correct de langage, il ne faut donc plus dire qu'on a frotté de l'ambre, car c'est l'éther qui a été agité, travaillé et modifié d'abord dans sa manière d'être. Le vieux Thalès ne s'en doutait pas — et il était excusable, car

nous avons attendu nous-mêmes le milieu du XIX^e siècle pour le savoir ou pour croire le savoir.

Considérons maintenant ce qui se passe dans un condensateur au moment où l'on rattache ses armatures aux pôles d'une source constante d'électricité, telle qu'une pile ; le diélectrique remplissant la coupure pratiquée dans le circuit est parcouru par un courant d'une durée extrêmement courte, parce que la tension développée dans l'isolant ne tarde pas à faire équilibre à celle de la source ; c'est le *courant de déplacement* auquel l'isolant oppose sa résistance élastique. De l'énergie est dépensée et emmagasinée dans le milieu interposé entre les armatures : elle sera restituée quand on déchargera le condensateur. Si le diélectrique était remplacé par une substance conductrice (ou bien si les armatures venaient en contact), l'appareil serait au contraire parcouru par un courant durable, gardant la même intensité aussi longtemps qu'agit sans variation la force électromotrice de la source ; son énergie se dépense sur les résistances rencontrées par le courant ; elle est transformée en chaleur, au fur et à mesure qu'elle se dépense, et correspond à une dégradation d'énergie opérée sans possibilité de récupération. Maxwell oppose de la sorte la résistance *visqueuse* des conducteurs à la résistance *élastique* du diélectrique, qui ne se traduit, dans ce cas, par aucun échauffement sensible (1).

Maxwell introduit nombre d'idées neuves en cinématique. L'espace entourant le fil conjonctif, jeté entre les pôles, conducteur d'un courant, possède, on le savait

(1) Cette théorie est résumée au chapitre premier du *Traité*, dans le paragraphe intitulé « Plan de cet ouvrage » (pages 66 et suivantes) et l'on s'y reportera avec intérêt et grand fruit : Maxwell y montre clairement comment, dans le courant de déplacement, « l'élasticité électrique ramène l'électricité en arrière, quand la force électromotrice est supprimée, tandis que, dans le fil conducteur, l'élasticité électrique est constamment vaincue, de telle sorte qu'il se produit un courant de conduction ».

déjà, les propriétés d'un champ magnétique dont les lignes de force affectent une autre allure par leur forme et leur disposition que les lignes électrostatiques, tout en présentant, comme elles, une tension suivant leur direction, en exerçant une pression normale à cette direction.

Ces lignes ne commencent plus en un point pour se terminer en un autre ; ce sont des lignes sans fin, des lignes fermées sur elles-mêmes, généralement des cercles concentriques à l'axe du conducteur, dont les plans lui sont perpendiculaires ; elles ne traversent pas le conducteur, elles l'encerclent ; elles l'enrobent. Un observateur, profilant un regard le long d'un conducteur, qui se prolonge, voit les lignes de force tourner dans le sens dans lequel il faudrait faire tourner un tire-bouchon pour le faire avancer avec le courant, suivant la règle pratique de Maxwell.

Les effets extérieurs de ce courant correspondent à ceux de la translation d'un corps électrisé le long du circuit. Or, considérons un corps électrisé, changeant de position dans l'espace, au sein d'un éther, d'un milieu stationnaire : celui-ci subira au passage du corps une impression, une contrainte. Cet état de « contrainte passagère » voyage avec le corps à travers le milieu ; on pourrait penser que le corps transporte son champ avec lui ; mais, en ne considérant que le milieu, on serait plutôt porté à dire qu'un champ est constamment créé et détruit. Cette perturbation s'étend au loin autour du circuit et dure tant que dure le mouvement. Nous supposons d'abord un mouvement uniforme, c'est-à-dire un courant constant. En ce cas, il y a production d'un champ magnétique superposé à un champ électrique, avec transport d'énergie le long du conducteur, dans la direction du mouvement.

Ce champ magnétique est donc la manifestation de la variation de polarisation du diélectrique, variation qui

semble suivre le mouvement du corps électrisé que nous venons de considérer, mais qui pourrait aussi bien en être l'origine dans le cas d'un courant, car la thèse accidentelle ne connaît que l'état électrique. Elle porte à croire, par conséquent, que le champ détermine le courant. La force électromotrice serait dès lors une force ayant son siège dans l'éther.

L'énergie électrique des phénomènes statiques était due au phénomène, appelé par Maxwell « déplacement », s'exerçant le long des lignes de force; l'énergie magnétique est prise sous la forme d'une force vive de rotation autour des lignes de force du champ magnétique, et on la fait correspondre à des tourbillons. L'énergie électrique était de forme potentielle; l'énergie magnétique affecterait la forme cinétique (1).

La direction des lignes de force magnétiques (celle du champ magnétique) est perpendiculaire à la direction primitive du champ électrostatique, c'est-à-dire à celle des lignes de force émanées du corps chargé, dont le mouvement constitue le courant.

Autre remarque : pour Maxwell, tout courant est fermé; même pour un tronçon de fil métallique le courant n'est pas ouvert, car, si l'on établit une différence de potentiel entre ses extrémités coupées, le circuit se complétera par le diélectrique, à travers lequel se propagera un « déplacement ». Nous avons vu que les choses se passent ainsi dans les condensateurs.

Comment expliquait-on les actions électrodynamiques d'Ampère, celles qui s'exercent entre des éléments de courant? Il conviendrait ici de faire connaître les

(1) A l'une correspond un vecteur axial, à l'autre, un vecteur polaire. Maxwell a paru admettre qu'entre les tourbillons existent des particules ténues, qui roulent sans glisser, en gardant contact avec les surfaces des tourbillons; ces particules seraient le support des propriétés électriques. Le modèle était calqué sur les roulements à billes.

calculs de Maxwell, mais nous ne pouvons entrer dans cette voie, et nous nous en tiendrons au modèle, ainsi que l'a fait Henri Poincaré, dans un lumineux travail de vulgarisation, auquel nous nous sommes déjà référé (1) ; à la suite d'un tel guide, nous nous aventurons le cœur léger dans le chemin épineux frayé par le génie anglais. Soient deux courants parallèles, que nous supposerons d'abord de même sens : l'éther est en mouvement dans l'intervalle qui les sépare ; sa force vive est, à intensité égale des courants, d'autant plus grande que les conducteurs sont plus voisins, et, à distance égale des circuits parallèles, d'autant plus grande que l'intensité des courants sera plus considérable. Ce système de conducteurs peut être comparé à un appareil bien connu des mécaniciens, le régulateur à force centrifuge de Watt, dont la force vive est proportionnelle au carré de sa vitesse angulaire et au carré de l'écartement des boules. Vient-on à en écarter les boules, il faut dépenser du travail pour maintenir la vitesse angulaire : de même, pour le système de nos deux courants, faudra-t-il fournir de l'énergie, si l'on veut que leur intensité ne décroisse pas, au moment où l'on rapprocherait les conducteurs (2). Dans le régulateur, la force centrifuge tend à faire diverger les branches et à écarter les boules, la vitesse angulaire de rotation étant maintenue constante ; dans le système des courants, le maintien de la constance de leur intensité entraînera de même une augmentation de force vive, donc un rapprochement, et, par conséquent, une attraction réciproque. Et voilà pourquoi ils s'attirent ! Maxwell a trouvé que son modèle constituait une démonstration ; on pourrait discuter sur ce point : nous

(1) H. Poincaré, *La théorie nouvelle*, etc., p. 12.

(2) Parce qu'on aura à surmonter une force électromotrice d'induction qui tendrait à diminuer l'intensité des courants, ainsi que nous le verrons plus loin.

nous contenterons de faire observer que le modèle s'applique également bien aux courants parallèles et de sens contraire, qui se repoussent et tendent à s'éloigner l'un de l'autre, parce que la distance augmente la force vive, l'intensité demeurant constante ; la force vive de l'éther est, en effet, alors d'autant plus grande que les circuits sont plus distants.

En tout cela, le maître anglais ne poursuit qu'un but, dénoncé par Poincaré : démontrer qu'une explication mécanique des phénomènes de l'électricité et du magnétisme est possible, et que les propriétés d'un milieu unique répondent aux conditions posées par les problèmes les plus divers.

Voyons comment les phénomènes faradiques d'induction trouvent place dans ce cadre.

Au centre d'un champ électrostatique nous situons un corps électrisé : ce corps vient-il à se mouvoir, d'un mouvement uniforme, un champ magnétique se superpose à l'autre, ainsi que nous venons de le voir. Mais si le mouvement est varié, le tableau n'est plus le même et la scène change. Lorsque l'intensité d'un courant subit des fluctuations, en période d'établissement ou autrement, ou bien encore lorsqu'il se produit dans le courant un changement de sens ou de direction, il se manifeste un effet nouveau, découvert par Faraday. Il apparaît un phénomène d'induction voltaïque.

Prenons d'abord le cas d'une augmentation d'intensité du courant et cherchons à prévoir ce qu'il en résultera dans l'ambient. Puisqu'un courant, circulant dans un fil, correspond au mouvement d'un corps électrisé le long de ce fil et provoque dans son champ un mouvement tourbillonnaire de l'éther, autour de ses lignes de force, prises comme axes de rotation, il est nécessaire que ces deux effets concomitants soient considérés comme intimement liés, et l'on peut dire qu'une augmentation d'intensité du courant correspond

à un accroissement de la force vive de l'éther. L'augmentation de la force vive de l'éther donne lieu à une réaction du milieu par résistance élastique : cette réaction diffère de la résistance visqueuse, qui résulterait d'un frottement ; elle est comparable à un effet d'inertie. Par suite de la liaison, que nous venons de relever, cette réaction a sa répercussion sur l'intensité du courant, qui ne s'établit donc pas instantanément : nous trouvons ainsi la cause de la *self-induction* découverte par Faraday. On ne l'attribue plus à l'inertie de l'électricité (une manière d'être n'a pas d'inertie), mais à l'inertie de l'éther et du milieu.

Le même mécanisme entre en action, mais en sens contraire, lorsque le courant diminue d'intensité, ou cesse de passer, auquel cas il tend à se prolonger, comme se prolonge le mouvement d'une masse animée de vitesse. En tout cela, l'inertie de quelque chose joue le principal rôle ; elle est une entrave ou une aide, suivant la loi de Lenz, en électricité et en magnétisme, comme en mécanique ; elle suffit à tout expliquer. Un courant constant ne donne lieu à aucune induction, puisque le mouvement de l'éther, une fois développé, se continue de lui-même. Qu'il y ait ou non un conducteur voisin à induire, il existe là une force électromotrice d'induction.

Dans un conducteur, cette force fait naître un courant.

Considérons maintenant le cas de deux fils conducteurs tendus dans le voisinage l'un de l'autre ; la naissance d'un courant dans l'un d'eux ou bien une augmentation de son intensité développe dans l'autre un courant induit secondaire, de sens inverse, par *mutuelle induction*.

Telle est, tracée à grands traits, la théorie générale de Maxwell : elle permet de rendre compte des phénomènes anciennement connus, en localisant leur origine dans le milieu, et en ne faisant jouer aux charges géo-

métriquement placées à la base des tubes de force qu'un rôle de fictions ; on arrive à l'exprimer en langue courante. Le langage mathématique se prête évidemment à un exposé plus précis et à une analyse plus pénétrante des actions électriques ; les relations que le professeur de Cambridge a établies entre les grandeurs fondamentales des champs sont devenues entre ses mains un instrument admirable. Elles l'ont conduit, c'est ce qu'il nous reste à faire voir, à deviner des faits que l'on ne soupçonnait pas avant lui.

Les équations de Maxwell présentent une particularité remarquable : on passe des unes aux autres en permutant les lettres qui représentent les composantes du déplacement électrique avec celles de la force magnétique ; elles impliquent par suite une loi de réciprocité entre les actions électriques et magnétiques (1). Maxwell en a déduit que toute variation du champ électrique produit un champ magnétique dont la force le long d'un contour fermé est égale à la variation du flux électrique ; il en résulte un déplacement variable et un courant de déplacement ; d'autre part, une variation de champ magnétique crée un champ électrique et développe une force électromotrice, dont la valeur en chaque point est égale au taux de la variation dans l'unité de temps du nombre de lignes de force qui y passent, en donnant lieu à un phénomène d'induction faradique. Toute espèce de perturbation électromagnétique fait naître ainsi deux champs, l'un magnétique, l'autre électrique, étroitement solidaires l'un de l'autre ; la variation de l'un engendre l'autre ; ils ne peuvent exister seuls, qu'à la condition de rester

(1) Hertz a complété l'œuvre de Maxwell en donnant à ses six équations une forme plus symétrique, qui met mieux en évidence la réciprocité des phénomènes électriques et magnétiques sur laquelle repose ce qui suit.

constants. Ils sont perpendiculaires l'un à l'autre et perpendiculaires tous deux à la direction de leur propagation. Nous constatons dès lors dans les phénomènes deux formes d'énergie, électrostatique et électrocinétique, potentielle et actuelle, comme le suppose la théorie ondulatoire de la lumière de Young et de Fresnel (1) ; de plus, on voit que les perturbations électrique et magnétique sont transversales à la direction de propagation, comme celles qui constituent la lumière.

Il y a plus. Les équations ne montraient pas seulement que les deux champs s'engendraient l'un l'autre ; elles laissaient voir que les perturbations se propagent dans le milieu avec une vitesse V égale à $\frac{1}{\sqrt{\kappa\mu}}$, K et μ étant exprimés dans le système électromagnétique et électrostatique (2). La valeur de V est précisément celle du rapport des unités électromagnétique et électrostatique de quantité. Or, ce rapport est lui-même égal à la vitesse de la lumière dans le vide. La génération des deux champs se poursuit donc de proche en proche dans l'éther, et elle y progresse avec une vitesse V égale à celle de la lumière traversant les espaces.

L'esprit de Maxwell rapproche ces données, qui ne sont pas de fortuites coïncidences. Il y joint une autre observation : μ est égal à 1 dans les corps transparents, de sorte que la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est inversement proportionnelle à la racine carrée du pouvoir inducteur diélectrique K ; la vitesse de la lumière est, d'autre part, inversement proportionnelle aux indices de réfraction des milieux traversés. « Il faut donc, dit-il, dans notre théorie,

(1) Maxwell, *op. cit.*, t. II, chap. XX, pp. 485 et suivantes.

(2) Rappelons que K est le pouvoir inducteur spécifique électrostatique et μ la perméabilité magnétique.

» que le pouvoir diélectrique d'un milieu transparent
» soit égal au carré de son indice de réfraction », et il constate que c'est à peu près vérifié pour la paraffine.

Il entrevoit alors, dans une intuition géniale, que l'œuvre de Fresnel peut être traduite en langage électromagnétique, et il annonce que la lumière est un phénomène électrique ! Et il crée de toutes pièces cette théorie merveilleuse, qui ne pouvait sortir que du cerveau d'un dieu, au témoignage d'un physicien allemand, peu enthousiaste de sa nature et non prodigue des expressions de son admiration pour la science anglaise (1).

La théorie dont je veux parler est connue sous le nom de *théorie électromagnétique de la lumière*. Ingénieuse fantaisie de mathématicien, a-t-on dit d'abord, poème mathématique admirable, grandiose création d'une imagination puissante, une vue d'aigle, dit-on généralement aujourd'hui. Quelle que soit l'opinion que l'on en ait, il faut reconnaître que cette théorie constituait une extraordinaire nouveauté, en l'année 1873. Alors la majorité des physiciens, enfin conquise à la théorie des ondulations, admettait que ce qui se propage dans l'éther ne pouvait être qu'un mouvement de ses éléments.

Cette nouveauté, il fallait l'expliquer, la justifier, en démontrer la vérité. L'argumentation reposait sur des calculs, dont nous ne pouvons ici que signaler l'existence, et sur des considérations logiques, que nous essaierons de résumer et de lier le mieux qu'il nous sera possible.

« Remplir l'espace d'un nouveau milieu toutes les
» fois que l'on doit expliquer un nouveau phénomène,
» ne serait point un procédé très philosophique », écrit

(1) « *Ist es ein Gott der diese Zeichen schrieb ?* » Boltzmann a inscrit ces mots en exergue de ses *Vorlesungen über Maxwell's Theorie* (Leipzig, 1891); traduction libre : *Incessu patuit deus !*

Maxwell ; en conséquence, il suppose que le diélectrique isolant et diaphane, à travers lequel les phénomènes d'induction se transmettent et se propagent, est aussi le siège des actions qui affectent notre rétine en produisant sur elle l'impression d'une intensité lumineuse : celles-ci comme ceux-là y sont localisés. Mais quelle en est la nature ? Ici nous passerons la parole à Poincaré. A cette question « Maxwell répond hardiment : » ce sont des courants ! Toute l'expérience de son temps » semblait le contredire ; on n'avait jamais observé de » courants que dans les conducteurs. Comment Max- » well pouvait-il concilier son audacieuse hypothèse » avec un fait si bien constaté ? Pourquoi, dans certaines » circonstances, ces courants hypothétiques produisent- » ils des effets manifestes, et sont-ils absolument inob- » servables dans les conditions ordinaires ? C'est que » les diélectriques opposent au passage de l'électricité, » non pas une résistance plus grande que les conduc- » teurs, mais une résistance d'autre espèce » (1).

Cette résistance d'autre espèce, nous l'avons déjà rencontrée sous la plume de Maxwell, et nous l'avons signalée à plusieurs reprises, en divers phénomènes ; c'est la résistance élastique, analogue à la résistance opposée au mouvement par un ressort, qu'il faut comprimer pour avancer, essentiellement différente de la résistance qu'on doit surmonter pour faire progresser un corps au milieu d'un liquide, plus ou moins dense et fluide, dont on coupe et dont on écarte les veines pour se frayer un chemin. Cette dernière résistance dépend de la vitesse du mobile : le travail dépensé pour la vaincre, est transformé en chaleur dans le liquide ; le mouvement se prolonge, tant qu'agit la force qui le produit ; celle-ci disparaissant, le corps s'arrête tout court, sans tendre à revenir en arrière.

(1) H. Poincaré, *La théorie de Maxwell*, pp. 11 et suivantes. Cf. aussi *Electricité et Optique*, pp. 155, 169, etc.

La résistance élastique est celle du ressort qui se bande ; elle va en croissant à mesure qu'il se tend et ne tarde pas à devenir insurmontable ; le mouvement prend alors fin, et l'équilibre s'établit. Mais si la force cesse d'agir, le ressort se débande et restitue tout le travail dépensé dans la phase antécédente, et l'on peut admettre que rien ne s'en convertisse en énergie calorifique. Les courants qui circulent dans les conducteurs (appelons-les les courants de *conduction*) ne rencontrent que de la résistance visqueuse ; ceux qui surmontent la résistance élastique sont déjà connus de nous, ce sont les courants de *déplacement* de Maxwell. Ils sont nécessairement de durée limitée, généralement très courte, à moins qu'ils ne se poursuivent sous forme alternative, auquel cas ils sont d'alternance rapide ; ils ne sont soumis ni à la loi d'Ohm, ni à celle de Joule, et ne produisent que des effets électromagnétiques et inductifs. On les voit à l'œuvre dans un condensateur, dont on met les armatures respectivement en communication avec les pôles d'une pile. Un courant instantané prend naissance, mais s'interrompt aussitôt que les armatures sont portées au potentiel des pôles ; un courant alternatif se prolonge au contraire, et franchit la coupure renfermant le diélectrique. Nous avons déjà dit que, pour Maxwell, tous les courants de déplacement sont fermés.

C'est dans ces courants qu'il faut chercher l'origine de la lumière. Une flamme est un phénomène électrique. Une onde lumineuse est constituée par une suite de courants alternatifs de déplacement, qui changent de sens un million de milliards de fois par seconde, se propagent par induction, d'une portion à l'autre du diélectrique, avec une vitesse que le calcul nous a démontrée égale au rapport des Unités, donc avec la vitesse de la lumière. Ces courants alternatifs sont des vibrations électriques ; s'ils étaient ouverts, l'électricité

se portant d'une extrémité des circuits à l'autre, s'accumulerait aux pôles, se condenserait par suite et se raréfierait, comme le fait l'air dans les vibrations sonores, et elle engendrerait des vibrations longitudinales. « Mais Maxwell n'admet que des courants fermés; » cette accumulation est dès lors impossible et l'électricité se comporte comme l'éther incompressible de Fresnel; ses vibrations sont transversales » (1); il démontre de plus que, dans un milieu isotrope, la densité reste constante, et il en déduit que le déplacement est perpendiculaire au plan de polarisation, comme le suppose la théorie de Fresnel.

Maxwell retrouvait de la sorte tous les éléments du mécanisme des ondes lumineuses; c'était un triomphe, un premier triomphe; mais il fallait autre chose pour arracher aux physiciens « séduits plutôt que convaincus », un assentiment complet; ces vues de l'esprit avaient besoin d'une confirmation expérimentale. La relation $K = n^2$, trouvée exacte pour les gaz et quelques liquides, ne se vérifiait ni pour l'eau, ni pour le verre, ni pour beaucoup de solides (2). La thèse de Maxwell attendait donc toujours son expérience cruciale; il fallut l'attendre vingt ans. Ce fut l'œuvre de Hertz.

Celui-ci a raconté, en 1889, aux naturalistes et médecins allemands, réunis en congrès à Heidelberg, comment il fut amené à entreprendre les travaux qu'il a eu le rare bonheur de mener rapidement à bonne fin et qui ont immortalisé son nom (3).

(1) Cf. H. Poincaré, *La théorie de Maxwell*, p. 18; *Electricité et Optique*, p. 170.

(2) Lorsque Maxwell formulait la loi $K = n^2$, il ne connaissait que le pouvoir de la paraffine $K = 1,97$, dont la racine carrée est 1,405 : or, $n = 1,422$; l'écart était notable, mais ces chiffres se rapportaient à deux états différents. On s'accorde aujourd'hui à admettre que la relation serait vérifiée si l'on comparait les résultats obtenus dans des conditions identiques, et si l'on opérait sur des isolants parfaits avec des ondes de longue période.

(3) La conférence de Hertz avait pour titre : *L'identité de la lumière et de l'électricité*; elle a été traduite et publiée par la REVUE SCIENTIFIQUE, dans le numéro du 26 octobre 1889.

Pas plus que Faraday, Maxwell n'avait réussi à démontrer, par une expérience indiscutable, que la propagation des forces à travers le diélectrique exige réellement un temps déterminé : tous les essais effectués dans ce but avaient échoué. De quoi s'agissait-il en somme ? De décharger une bouteille de Leyde et d'observer s'il y avait un retard dans l'oscillation d'un électroscope voisin. Comme celui-ci ne pouvait guère être éloigné de la bouteille que d'une dizaine de mètres, il fallait apprécier un intervalle de temps de l'ordre des millièmes de seconde. C'était assurément une opération délicate, mais Foucault en était venu à bout, puisqu'il avait mesuré en chambre la vitesse de la lumière. Malheureusement, en électricité, la difficulté la plus grande ne consistait pas dans l'appréciation d'un intervalle de temps excessivement court ; elle résidait surtout en ce que l'on ne possédait pas de repère assez bref et assez précis pour marquer le moment initial et final du phénomène de propagation. « Lorsque nous voulons, disait Hertz, prendre une » longueur jusqu'au dixième de millimètre, nous n'en » marquons pas le commencement par un gros trait à » la craie ; si nous voulions déterminer un temps au » millième de seconde près, il serait absurde d'en » marquer le début par le son d'une grosse cloche ». Le fruit des longues réflexions du jeune savant (il avait alors 24 ans) fut qu'il fallait renoncer à résoudre le problème directement : au lieu d'aborder l'obstacle de front, il le tourna, conformément aux préceptes de la stratégie.

De célèbres expériences de Feddersen, dont lord Kelvin avait donné la théorie, lui servirent de point de départ.

Un condensateur, qui se décharge à travers un conducteur ayant une capacité C et une self L , ne le fait pas d'un coup et en un seul temps, mais d'une façon

alternante, ce qui veut dire qu'il se produit une série d'étincelles discontinues, jaillissant d'une électrode A à une électrode B, puis de B en A, et ainsi de suite. On le constate en glissant rapidement une carte entre les deux électrodes ; elle présente une série de petits trous, percés alternativement de la face avant à la face arrière du carton et réciproquement. On dit que la décharge est oscillante. Il se produit un va-et-vient entre les armatures pendant que s'effectue la décharge, et ce va-et-vient est analogue au mouvement d'un diapason, mis en vibration. La durée de la période est calculable ; sa valeur T est proportionnelle à la racine carrée du produit de la capacité par la self (1). Feddersen avait réalisé des périodes de l'ordre du millièmième de seconde. Hertz perfectionna le dispositif en intercalant des plaques métalliques dans le circuit et en terminant les conducteurs par des boules, bien polies et de distance réglable à volonté ; la coupure ainsi opérée partageait l'appareil en deux moitiés symétriques qui étaient reliées respectivement aux bornes d'une bobine de Ruhmkorff. Par ce procédé, l'étincelle conservait une valeur constante de sa période, et celle-ci pouvait être abaissée à l'ordre du billionième de seconde. Nous venons de décrire ce qu'on a appelé l'*excitateur* de Hertz ; c'était un centre de vibrations électriques, qui se propageaient dans le diélectrique ambiant : de ce centre partaient des courants de déplacement et des effets d'induction.

Comment a-t-on pu mettre ces effets en évidence ? Hertz se servit, comme appareil d'investigation, d'un cerceau de métal, constituant un circuit ouvert en un point : il faisait varier la grandeur de la coupure par

(1) La formule exacte est $T = 2\pi \sqrt{CL}$; il est nécessaire que la résistance R du circuit parcouru par le courant de décharge soit plus petite que $\sqrt{\frac{4L}{C}}$, sinon la décharge serait continue.

l'emploi d'une vis micrométrique, dont se trouvait munie une des extrémités du conducteur formant le cerceau. Dans son idée, empruntée à l'acoustique, c'était un résonateur. Quand un diapason vibre, ses vibrations se transmettent à l'air ambiant, et si un autre diapason d'accord avec le premier est amené dans le champ sonore, il entre à son tour en vibration. De même, l'excitateur développe une perturbation dans le champ électrique créé par lui et fait vibrer l'appareil voisin, si la période est la même (1). Il joue donc bien le rôle de résonateur.

« La solution du problème se présentait dès lors d'elle-même », s'écriait Hertz dans sa conférence. En effet, présentant le cerceau-résonateur à l'excitateur à deux mètres, à quatre mètres, voire même à vingt mètres et plus, à travers cloisons et murs en maçonnerie, on vit, dans l'obscurité, jaillir dans l'intervalle micrométrique une minuscule étincelle ; elle dénotait par sa présence la propagation d'une action électrique depuis l'excitateur, qui la produit, jusqu'au détecteur qui la révèle à l'observateur. La géniale découverte était faite et Hertz pouvait entonner un triomphal *ευρηκα*.

Il devenait pour lors possible, il était même aisé de mesurer la vitesse de propagation de l'onde en empruntant à l'acoustique et à l'optique la méthode des ondes stationnaires (2). Elle est classique et n'exigera de nous qu'un rappel sommaire. Suivons dans sa progression une de nos perturbations périodiques, se propageant le

(1) Il faut pour cela que la valeur de $2\pi\sqrt{CL}$ pour le résonateur soit elle-même celle de l'excitateur.

(2) La considération de ces ondes est due au colonel du génie Savart, qui fit ses premières expériences dans les fossés des fortifications de Strasbourg, en se servant d'un pendule acoustique très sensible aux vibrations de l'air. Wiener a observé les ondes stationnaires produites par des ondes lumineuses dans des couches de bromure d'argent, à grain suffisamment petit, relativement à la longueur de l'onde.

long d'un fil ou le long d'un axe quelconque de longueur finie ; arrivée à son extrémité, qui lui barre le chemin, elle se réfléchit et revient en arrière, en croisant celles qui continuent de venir d'amont ; elle se compose et interfère avec elles. En certains points les perturbations d'aller et retour sont de même phase et elles s'ajoutent ; c'est qu'alors les courants alternatifs, dus aux deux perturbations, sont tous deux positifs ou négatifs en même temps ; elles se retranchent, là où elles présentent des phases contraires, c'est-à-dire lorsque les courants de l'une sont positifs au moment où ceux qui sont dus à l'autre sont négatifs.

Or, il est aisé de démontrer que pour les perturbations directe et réfléchie qui s'ajoutent, parce qu'elles sont de même phase, la différence de marche est d'un nombre entier de longueurs d'onde (1) : en ces points, l'action est maximum, et il se produit ce qu'on appelle un ventre. Au contraire, on constate l'existence d'un nœud, c'est-à-dire d'un point d'action nulle, quand la différence de marche est d'un nombre entier de demi-longueurs d'onde. Ventres et nœuds sont fixes, dans l'espace, d'où le nom d'ondes stationnaires ; de ventre à ventre et de nœud à nœud, on mesure une demi-longueur d'onde. De la distance de deux nœuds consécutifs, on déduit par conséquent la valeur du produit $\frac{1}{2} VT$ et finalement celle de V ; si l'on peut calculer celle de T .

Or, l'existence d'un nœud était révélée à Hertz par

(1) On s'en rend compte également bien par la formule $w = a \sin \left(2\pi \frac{t}{T} + \delta \right)$

ou bien par le tracé des sinusoides correspondantes ; mais il faut tenir compte de ce que la réflexion se produit avec changement de signe contre un obstacle solide, tel que l'extrémité fermée d'un tuyau, un mur, ou encore le bout d'un fil ; $\delta = \frac{d}{\lambda} = \frac{d}{VT}$, d étant la différence de marche et λ la longueur d'onde, c'est-à-dire le chemin parcouru dans le temps T .

l'absence d'étincelles à son résonateur ; la formule de lord Kelvin lui faisait connaître T ; il put donc mesurer V . Il trouva, après quelques tâtonnements, une valeur voisine de la vitesse de la lumière, soit d'environ 300 000 kilomètres par seconde. Son expérience constituait par suite l'*experimentum crucis* de la théorie et en justifiait toutes les conclusions : nous signalerons rapidement les principales.

Ainsi que cela avait été annoncé, le rayonnement électrique se propage par ondes à travers le diélectrique et l'éther, à l'instar de la lumière, avec la même vitesse ; l'admiration et la reconnaissance des savants leur ont donné le nom d'ondes hertziennes. Les phénomènes produits par elles sont entièrement comparables à ceux de la lumière : l'intensité varie en raison inverse du carré des distances ; en plaçant l'excitateur au foyer d'un miroir parabolique concave, on forme un faisceau parallèle de rayons, que l'on dirige où l'on veut ; sa trajectoire rectiligne est brisée par un réflecteur, constitué par un plan de matière conductrice, ou par un réfracteur, réalisé par un grand prisme d'asphalte ou d'autre substance isolante. La vibration a une direction constante et elle est par conséquent assimilable à celle de la lumière polarisée ; elle est transversale et perpendiculaire au plan de polarisation, ainsi que Maxwell l'avait dit. En faisant usage d'un réseau formé de fils métalliques tendus parallèlement, Hertz changeait à volonté l'orientation du plan de polarisation, ce qui lui a permis d'instituer des expériences variées, fournissant autant de points de contrôle. En somme, entre les ondes lumineuses et calorifiques et les ondes électriques, il n'y a que des différences de longueur ; alors que les premières ont un λ de quelques dixièmes de micron, celui des ondes de Hertz se mesure, à partir de 3000 microns, en mil-

limètres, mètres et kilomètres (1). Bref : Hertz était en droit de proclamer que « l'identification de la lumière » et de l'électricité, que la science soupçonnait, que la » théorie prévoyait, est établie définitivement ; elle est » devenue perceptible à nos sens, intelligible à l'esprit ; » des hauteurs que nous avons atteintes, où se confon- » dent les deux ordres de phénomènes, notre regard » plonge dans les domaines de l'Optique et de l'Électri- » cité..... L'Optique n'est plus qu'un appendice de » l'Electricité » (2).

Voilà le résultat majeur de la théorie de l'électricité-accident, de l'électricité considérée comme une manière d'être, le résultat direct bâti sur le roc granitique d'une expérience indiscutable, confirmé par une invention sensationnelle, inattendue, merveilleuse, qui suffirait à elle seule pour illustrer une théorie et une école, la télégraphie sans fil !

La philosophie naturelle est redevable à Faraday, Maxwell et Hertz d'un progrès dont la portée a été immense : Hertz l'a caractérisé avec optimisme, sans doute, mais non sans quelque vérité, dans sa conférence de Heidelberg. En « ramenant la question de la » nature de l'électricité à la question de l'état des forces » dans « l'espace », a-t-il dit, la science nouvelle a con- » tribué à la solution de cet autre problème, le plus » important de tous, celui de la nature et des propriétés » de la substance qui remplit l'espace, de l'éther, de sa » structure, de ses mouvements, de ses limites, s'il en

(1) La grandeur de la longueur d'onde hertziennne a été un obstacle aux premières expériences, car, en vertu du principe de similitude, il fallait multiplier dans la proportion des λ les dimensions linéaires des appareils : ainsi, pour l'onde fournie par l'excitateur primitif de Hertz (6 mètres), il eût fallu un miroir d'un myriamètre carré pour jouer le rôle en lumière d'un miroir d'un millimètre carré.

(2) Maxwell avait encore déduit de sa théorie que les ondes lumineuses exercent sur la surface qu'elles frappent normalement une pression dont il a calculé la valeur : celle-ci a été vérifiée et les résultats de l'expérience concordent remarquablement avec ceux du calcul.

» possède. Nous voyons de plus en plus cette question
» dominer toutes les autres ; il semble que la connais-
» sance de l'éther ne doive pas seulement nous révéler
» l'état de la substance impondérable, mais nous dévoiler
» l'essence de la matière elle-même et de ses propriétés
» inhérentes, la pesanteur et l'inertie..... Les
» anciens systèmes de physique se résumaient à proclamer
» que tout est formé d'eau et de feu ; bientôt la physique
» moderne se demandera si toutes les choses existantes
» ne sont pas des modalités de l'éther. C'est là la fin
» dernière de notre savoir » (1).

La théorie de Maxwell atteignait son apogée à l'époque où son illustre continuateur prononçait ces paroles enthousiastes ; les six fameuses équations, auxquelles elle avait conduit, semblaient avoir épuisé le sujet et résolu le problème purement spéculatif ; d'autre part, il était établi et mis hors de toute contestation, que la lumière consistait dans une perturbation électromagnétique en propagation dans le diélectrique. La plupart des physiciens étaient au diapason de Hertz ; Chwolson a écrit que dès lors « il était permis d'espérer » que le côté purement mécanique des déformations et perturbations dans l'éther, où devait se trouver la nature réelle, inaccessible à l'observation directe des phénomènes électriques et magnétiques, serait rapidement connu dans toutes ses particularités et que ces déformations et perturbations prendraient leur place dans tous les chapitres de la physique où l'on étudie les manifestations de l'énergie électrique ».

Au témoignage de l'érudit professeur de Pétersbourg, ces espérances étaient fondées... en 1889 : malheureusement, en 1910, il faisait suivre les lignes qui

(1) Hertz, *loc. cit.*, p. 518. Il y aurait lieu de formuler ici une réserve relativement à l'éther sans limites, dont le savant admet la possibilité.

précèdent de l'aveu découragé que voici : « ces espérances ne se sont pas réalisées ! » (1)

C'est qu'en effet les glorieux pronostics ne s'étaient point effectués et la thèse de l'électricité accidentelle n'avait pas donné ce qu'on en avait attendu.

Quelques-uns en font remonter la responsabilité au maître anglais dont l'œuvre « ne forme pas un seul ensemble d'idées ; il donne plusieurs théories se rapportant au même sujet, puis il les abandonne successivement, de sorte qu'on y trouve plutôt un mélange de théories qu'une théorie unique » ; on lui a reproché de n'avoir fait que juxtaposer ces théories, sans réussir à les marier ; on a dit de lui, ce qu'on avait dit de celui à qui nous avons emprunté la citation précédente, qu'il s'était montré « plus conquérant que colonisateur ».

Ces jugements, dont nous nous sommes faits l'écho, ne sont pas injustifiés, mais ne sont-ils pas des clichés, que l'on reproduit, sans plus les discuter ? Ne devrait-on pas se demander si les concepts, que Maxwell n'a sans doute pas soudés suffisamment entre eux, pouvaient l'être d'une manière satisfaisante ? N'a-t-il point subi une inéluctable nécessité en maintenant « des divisions profondes » entre les diverses parties de sa théorie, et en y formant, ainsi qu'on le répète toujours, « des compartiments séparés et sans communication » ? En d'autres termes, qui fallait-il accuser d'incohérence, l'auteur des théories ou ces théories elles-mêmes ?

Ceux qui ont accusé Maxwell de n'avoir pas fait mieux, n'ont guère eu plus de succès que lui : c'est donc qu'il était impossible de tirer meilleur parti des éléments dont il disposait. Pour représenter mécaniquement les déformations de l'éther que l'on faisait

(1) Chwolson, *Traité de physique* t. IV, 1^{er} fasc., p. 9.

intervenir, il fallait lui prêter des propriétés complexes, souvent étranges, quelquefois même contradictoires. La faute n'en était pas à Maxwell, mais aux matériaux mis en œuvre.

On se prit donc légitimement à discuter la qualité de ces matériaux.

Et l'on constata que la thèse de l'électricité-accident était incapable d'expliquer un certain nombre de phénomènes de rayonnement et de transport d'ondes. Maxwell nous avait fait assister à la genèse de leur formation et nous les suivions dans l'éther ; mais nous perdions leur trace au moment où la matière les absorbe ; que devenaient-elles alors ? On ne voyait pas non plus pourquoi les ondes se propagent autrement dans les milieux matériels que dans le vide, ni pourquoi, dans un même milieu, la vitesse de leur propagation dépend de la nature de la perturbation, et spécialement de la fréquence de l'onde périodique. La théorie ne fournissait qu'une clarté douteuse relativement aux phénomènes de dispersion ; elle ne rendait pas compte des lois de la propagation des ondes dans les corps en mouvement. On constatait une relation entre l'opacité des corps pour la lumière et leur conductibilité électrique. Les métaux conducteurs sont opaques ; le sélénium qui est isolant, quand il est transparent, devient opaque, lorsque le recuit l'a rendu conducteur : cela résulte évidemment d'un lien unissant l'éther à la matière ; mais ce lien ne trouvait pas son expression dans les équations. Les phénomènes de l'électrostatique ne laissaient pas que de soulever aussi des mystères insondés. Nous voyons bien comment les lignes de force partent d'un conducteur positif et aboutissent à une surface électrisée négativement, mais cette manière d'envisager les choses ne donne aucune idée de la façon dont ces lignes s'attachent à la matière en conservant leur mobilité. En électrocinétique, nous

avons vu, avec Poynting, le flux d'énergie circuler dans le vide et dans l'isolant qui entoure le fil conducteur du courant, sans découvrir comment ce flux pénètre dans le conducteur pour s'y manifester par des énergies de diverses formes et finir en chaleur de Joule, qui en est la forme la moins noble.

Ces échecs n'étaient pas les seuls que la théorie avait subis.

Le plus grave était celui-ci. Malgré tous les efforts d'un demi-siècle d'études, les actions chimiques des courants, si bien analysées et codifiées par Faraday, se refusaient à entrer dans le cadre général de sa théorie, et restaient réfractaires au concept de l'électricité-accident, alors qu'elles s'adaptaient si directement et si simplement à celui de l'électricité-substance. En effet, prenons de nouveau pour exemple le composé NaCl, chlorure de sodium, dissocié par sa dissolution dans l'eau ; les quantités égales d'électricité positive, portée par l'ion Na, et négative, liée à l'ion Cl, se comprenaient bien dans l'hypothèse du *substratum* matériel, mais répondaient mal à l'idée d'une quantité fictive, résultant d'une condition de l'éther localisée en ces ions. A un moment donné, les charges abandonnent les atomes Na et Cl et se dirigent vers l'électrode qui les attire ; dans le passage de l'atome à l'électrode, la charge est sans support ; cela ne se comprend pas d'une manière d'être. C'est la charge des ions qui les met en marche vers l'électrode d'électrisation contraire ; on invoquera ici une déformation du milieu liquide diélectrique, pour ne pas en appeler à l'action à distance répudiée par l'école ; mais on n'évite pas le concept de charges individuelles, déterminées, attachées aux flancs des atomes matériels. Enfin et surtout, d'après la seconde loi de Faraday, tous les atomes monovalents possèdent, en valeur absolue, une charge égale à celle des atomes précités

du sodium et du chlore, les atomes bivalents une charge double, les polyvalents la charge unitaire multipliée par un nombre entier ; l'analogie est évidente avec la loi des proportions multiples de Dalton en chimie ; or, la loi chimique a conduit au concept d'un atome matériel ; la loi électrolytique suggère de même l'atome d'électricité. La charge correspondant à chaque valence est une quantité invariable, indivisible comme l'atome lui-même, une constante universelle.

Voici d'autres difficultés ; je ne ferai que les signaler et les livrer aux méditations du lecteur. La chaleur ne se conserve pas, mais l'électricité se conserve. De nombreux phénomènes, en particulier la conductibilité unipolaire découverte par Erman, en 1845, révèlent une dissymétrie qui ne correspond pas à l'hypothèse de la manière d'être. Etc.

Ces objections ramenaient invinciblement les esprits vers l'idée de l'électricité-substance. Cette conséquence avait été entrevue par Maxwell, car nous lisons, à la page 434 du Tome II de son *Traité*, que la quantité dont sont chargés les anions et les cations est une *charge moléculaire* : de là à l'idée de la molécule d'électricité, il n'y avait pas loin (1). En 1881, Helmholtz développait la pensée : « Si nous acceptons » l'hypothèse que les corps simples sont composés » d'atomes, nous sommes tenus d'admettre pareillement que l'électricité positive ou négative est composée de parties élémentaires, qui se comportent » comme des atomes d'électricité ». Et Lodge avait souligné cette considération en parlant « d'une unité » naturelle, appelée avec raison atome d'électricité, » telle qu'en dessous d'elle nous ne connaissons

(1) Il est vrai que Maxwell revenait, quelques pages plus loin, sur cette concession, attendu que l'hypothèse des charges moléculaires lui semblait, en somme, « extrêmement improbable » ; c'était en 1873.

» rien » (1) ; en effet, on ne rencontre pas de quantités d'électricité plus petites que cette dernière parcelle de matière.

Les électriciens faisaient donc derechef de l'électricité une chose, une substance, possédant une existence propre ; non pas assurément qu'ils revinssent simplement aux deux fluides de Symmer, mais ils matérialisaient de nouveau cet agent, dans lequel ils n'avaient plus voulu trouver naguère qu'une condition, et une manière d'être. On reprenait des idées, mises au rebut peu de temps auparavant, ce qui provoquait de la part d'Henri Poincaré la spirituelle boutade que voici : « il » y a quinze ans à peine, il n'y avait rien de plus » ridicule, de plus naïvement vieux jeu que les fluides » de Coulomb, et pourtant les voilà qui reparaisent » sous le nom d'électrons » (2). Ils reparaissent sous un nom et sous un vêtement différents, mais c'étaient bien eux, on ne pouvait s'y tromper. Ils reparaissent, parce qu'on avait besoin d'eux : la discipline intellectuelle, conçue en dehors d'eux, avait été trop incohérente en quelques-uns de ses chapitres pour s'imposer à la science ; en d'autres, elle avait été tellement artificielle dans son ingéniosité, en plusieurs, elle s'était montrée si impuissante et si nettement incorrecte qu'on s'en était lassé et qu'il avait fallu s'en séparer. La considération d'une substance électrique venait sauver une situation perdue. Nous avons constaté ci-dessus avec étonnement que la théorie matérielle ait témoigné d'une si grande force de résistance contre les thèses nouvelles ; elle la devait non seulement aux facilités d'exposition qu'elle possédait, mais plus encore à la

(1) Lodge, *Modern Views on Electricity* ; cité par M. Drumaux, dans la *Théorie corpusculaire de l'Electricité* (Paris, Gauthier-Villars, 1911), p. 10.

(2) H. Poincaré, *La Science et l'hypothèse*, p. 194. C'est M. Johnstone Stoney qui a donné en 1874, le nom d'*Electron* à l'atome d'électricité, que lord Kelvin eût voulu appeler l'*Electrion*.

part de vérité qu'elle contenait ; les théories qui expriment quelque chose de réel ont la vie dure ; elles ne meurent pas tout entières.

Cette part de vérité latente ne tarda pas, du reste, à être mise en complète évidence à la suite de découvertes extraordinaires, qui ont révélé un grand nombre de choses ignorées et ont ainsi exercé une influence considérable sur l'évolution des idées que nous venons de retracer. Un exposé rapide de l'ensemble de ces constatations, inexplicables dans l'hypothèse de l'électricité accidentelle, achèvera de démontrer que celle-ci devait nécessairement être abandonnée.

L'étude expérimentale des décharges dans les tubes à gaz raréfié, qui devait tant contribuer à l'étude des courants, a débuté par l'œuf de de la Rive, qui permettait de suivre les modifications de l'étincelle accompagnant le progrès du vide ; en 1855, Gassiot et Plücker imaginèrent les tubes, auxquels Geissler, l'habile souffleur de verre de l'Université de Bonn, a donné son nom, et l'on admira les belles couleurs des gerbes de feu jaillissant de l'électrode positive (de l'anode), les lueurs violacées entourant l'électrode négative (la cathode), et les stratifications étagées dans l'intervalle ; on en était alors tout au plaisir des yeux. Mais, en 1869, Hittorf appliqua ces tubes aux observations spectroscopiques et il appela l'attention des physiciens sur la région sombre voisine de la cathode (1). Le vide ne dépassait guère jusqu'alors 2 à 3 millimètres de mercure ; en le portant au millième de millimètre, Crookes mit en évidence, avec un rare bonheur, les rayons émanés de la cathode (les *rayons cathodiques*) qui surgissent normalement de la surface

(1) On confond quelquefois à tort la région sombre de Hittorf, intercalée entre les couches cathodiques violacées, avec l'espace noir de Faraday qui leur succède et précède les strates : pour Crookes, cet espace mesurait le chemin moyen libre des particules gazeuses projetées en avant de la cathode.

de leur électrode, marchent droit devant eux dans le tube, quelle que soit la position de l'anode, et développent dans la paroi de verre qu'ils frappent, une fluorescence vert-jaunâtre, qui fut à peine remarquée. Les tubes de Crookes provoquèrent vivement l'attention des physiciens, et ils la méritaient ; on croyait analyser des phénomènes lumineux, mais en réalité cette coupure, pratiquée dans le circuit, permettait de faire l'anatomie du courant électrique. La considération, reprise de Faraday, d'un quatrième état de la matière, appelé par lui *l'état radiant*, et la théorie ingénieuse du bombardement moléculaire de Crookes rendirent compte de plusieurs particularités des phénomènes, mais on ne trouva aucune explication du fait, découvert peu de temps après, plus remarquable qu'on ne le crut d'abord, de la déviation des rayons cathodiques par les champs magnétique et électrique dans des conditions entièrement indépendantes de la nature du gaz et de celle de la cathode. Ces rayons cathodiques constituaient l'élément principal du phénomène, avec les rayons anodiques (*die Kanal-strahlen*) que Goldstein découvrit en perçant des trous dans la cathode et en cherchant ce qui se passait derrière elle ; ils devinrent l'objet d'intéressantes observations de J. J. Thomson, J. Perrin, Wien, Lenard, Kaufmann, Villard, etc., de 1883 à 1900 ; Lenard trouva le moyen de faire sortir les rayons cathodiques de leur prison de verre par une fenêtre, fermée par une lamelle d'aluminium. Lenard et Perrin découvrirent ensuite que ces rayons chargent négativement les conducteurs qu'ils rencontrent sur leur chemin, et réduisent une lame de cuivre superficiellement oxydée. Les physiciens s'efforçaient en vain de faire correspondre ces effets inattendus avec les images qu'ils se formaient alors des phénomènes électriques.

En 1895, Röntgen eut la main particulièrement

heureuse, et il fut singulièrement favorisé par la fortune en découvrant l'action exercée par les rayons émanés de l'anticathode vert-jaunâtre des tubes de Crookes, sur un cadre recouvert de platino-cyanure de baryum, à travers une enveloppe de papier noir entièrement imperméable à toutes les radiations lumineuses et actiniques du spectre. C'étaient les rayons X, capables d'impressionner les plaques photographiques à travers les corps les moins diaphanes, rayons inflexiblement rectilignes ne connaissant ni réflexion, ni réfraction, ni polarisation, indéviés à l'aimant, possédant eux aussi la propriété de décharger les corps, radiations ne rentrant dans aucune catégorie connue. Le voile mystérieux qui recouvrait tous ces phénomènes s'épaississait de plus en plus, et pourtant on n'en était encore qu'aux premières surprises.

H. Becquerel se demanda un jour si les corps phosphorescents émettaient des rayons X, et il découvrit que les sels d'uranium et ce métal lui-même en fournissaient continûment; ce qui amena les Curie, Debierne et les autres à reconnaître les propriétés du thorium, du polonium, du radium, de l'actinium, et en général la *radioactivité*, qui consiste dans l'émission par ces métaux, en même temps que de certaines émanations, de rayons de même nature que les cathodiques, les anodiques et les rayons X.

Vinrent alors les actions magnéto-optiques de nouvelle espèce, déterminées par les champs magnétiques intenses sur la flamme d'un brûleur Bunsen monochromatique, observées par le hollandais Zeeman; les raies spectrales caractéristiques des vapeurs métalliques se décomposent en doublets et triplets, polarisés rectilignement ou circulairement dans des conditions complexes, dont la sagacité et la patience des chercheurs ont eu rapidement raison, mais qui défiaient toute explication par les théories admises jusque-là.

Les rayons X ne jouissent pas seuls de la faculté de décharger les conducteurs électrisés : ils la partagent avec les rayons cathodiques et les radiations ultraviolettes, mais ces dernières n'agissent que sur des charges négatives, et leur influence est plus marquée pour certains métaux que pour d'autres. Une analyse judicieuse des faits a montré que ces effets peuvent être attribués à une certaine conductibilité acquise par l'air ambiant, qui se développe aussi au voisinage d'un corps incandescent, d'une flamme, d'un fragment de phosphore, etc. Mais cette conductibilité, à laquelle on a donné le nom significatif d'*ionisation*, pour des raisons que nous dirons plus loin, présente des caractères spéciaux, qui déroutent toutes les notions que l'on possédait relativement à la conduction. Ainsi la résistance d'une colonne de gaz n'est plus calculable par la loi d'Ohm et de Pouillet, et, contrairement à toute attente, elle diminue en certains cas lorsque sa longueur augmente ; M. Righi a même fait la découverte paradoxale que l'on peut faire perdre de la conductibilité à une tranche d'air comprise entre deux plateaux métalliques parallèles électrisés en signe contraire. Ces phénomènes et d'autres encore, qui seront décrits ultérieurement et étudiés par le détail, ne trouvaient pas de place dans le cadre du concept faradique maxwellien : on en fit la troublante constatation au seuil du xx^e siècle, à l'époque même où le savoir et l'habileté des praticiens de l'électricité enfantaient des merveilles.

Remarquons qu'en ce même temps les idées atomistiques prenaient une place prépondérante en physique, au détriment du dynamisme ; la discontinuité de la matière et sa structure granulaire étaient un fait acquis, mais au lieu de considérer des éléments agissant les uns sur les autres, à distance, on les faisait se mouvoir et s'entre-choquer ; la théorie cinétique reprenait faveur, et toutes les dernières découvertes relatives

à la diffusion, à la conductibilité et au rayonnement consacraient son triomphe. Les théoriciens de l'électricité étaient menacés de perdre tout contact avec les autres sciences, s'ils ne renonçaient à l'hypothèse de l'électrisation manière d'être.

Il ne s'agissait pas de faire table rase du passé ; des deux théories qui avaient successivement régné, on pouvait conserver ce que l'expérience avait confirmé ou du moins n'avait pas infirmé ; de ce que l'on retenait, il fallait former une combinaison logique, en harmonie avec les plus récentes acquisitions de la science expérimentale. De l'ancienne théorie des fluides, on gardait la considération d'entité spéciale, d'une substance particulière, possédant une existence réelle, mais il fallait la faire discontinue et la doter d'une double individualité, correspondant aux deux signes. L'électricité est par conséquent un élément diversement figuré, qui réside en des points déterminés, et recouvre des surfaces ; c'est une chose active, créant un champ autour d'elle, quand elle reste en repos, donnant lieu à des actions magnétiques, thermiques et autres, et produisant des effets d'induction, lorsqu'elle est en mouvement. Du second concept, celui de Faraday et de Maxwell, il fallait garder la notion d'une énergie résidant dans l'éther et dans les éléments pondérables du milieu, cause immédiate des actions au point où on les observe, agent unique des phénomènes qui traduisent les modifications qu'il subit dans son état ; ces modifications se manifestent par le rayonnement et interviennent dans la propagation des ondes électriques, lumineuses, calorifiques et autres, dont elles expliquent le mécanisme.

Lorsqu'on demandait autrefois aux tenants des fluides quel était l'effet d'une charge, isolée dans l'espace, tant qu'on n'y introduisait aucun corps susceptible d'être influencé par le champ, ils répondaient que cet effet était nul : sur quoi l'électricité aurait-elle

agi ? Pour Faraday, cette charge constituait un champ, en modifiant le milieu antérieurement à l'introduction du corps et indépendamment de sa présence. C'était bien ainsi qu'il fallait envisager les choses, mais sous réserve de ce qui suit : les premières théories ne considéraient que ce qui se passait dans les conducteurs et ne s'occupaient pas assez du milieu ; les secondes avaient le tort opposé de ne considérer que ce qui se passait dans l'éther et de faire de la surface du conducteur la limite de la région intéressée aux phénomènes ; il y avait là quelque chose à réformer.

La constante diélectrique et la perméabilité magnétique d'une substance ne sont plus des grandeurs qui la caractérisent spécifiquement, mais elles sont déterminées par les propriétés, la position et le mouvement des particules d'électricité qu'elle renferme.

On revenait aux idées émissionnistes et aux hypothèses balistiques, aux effets de chocs et à toutes leurs conséquences dynamiques et autres.

En somme, le grain d'électricité s'introduisait dans la théorie de Maxwell, en vertu d'un compromis, et il la fécondait à la façon d'un germe que l'on dépose dans une terre fertile, et qui y fait lever une brillante moisson.

C'est ce dont nous allons être témoins.

CHAPITRE III

L'ÉLECTRON, GRAIN D'ÉLECTRICITÉ

Faraday et les physiciens de son école faisaient consister tous les phénomènes électriques ou magnétiques dans des déformations et des perturbations de l'éther ; ils situaient dans l'éther non seulement le siège, mais encore l'origine des forces qui se manifestent dans la succession graduée des formes diverses de l'énergie mécanique calorifique, lumineuse, chimique, rayonnante, électrique, etc. L'éther était le réceptacle de toute l'énergie de l'Univers ; et cet Univers n'était fait que de matière, d'éther et d'énergie. Inutile d'en appeler à aucune substance spéciale : dans leur vocabulaire, l'électrisation, qui est un état, remplaçait la chose qu'autrefois on dénommait électricité. La puissance du génie des Maxwell et des Hertz, pour ne citer qu'eux, plus encore que la valeur de leur théorie et les ressources de leur méthode, les conduisit à découvrir des faits imprévus, à établir des relations inattendues et à formuler des lois remarquables, dont l'expérience confirma l'exactitude.

Mais la doctrine, pour large qu'elle fût, était trop courte par endroits, et il arriva qu'elle ne suffit plus à rendre compte de tout ce que l'on découvrait ; toutes les théories connaissent tôt ou tard cette épreuve ; elles n'en meurent pas toujours. Avec du temps et de la persévérance, on trouve quelquefois des solutions libéra-

trices : celles-ci se faisaient attendre dans les circonstances présentes.

Voici qui était plus grave. Le modèle représentatif du champ des déformations de l'éther, pour être dessiné conformément aux apparences et avec précision, suscitait néanmoins de sérieuses difficultés d'interprétation de l'ensemble des phénomènes. La tension longitudinale des tubes de force s'exerce dans une direction et dans un sens déterminés : pourquoi ? Cette tension, qui correspond à une contrainte du milieu, éther et diélectrique, aboutit à un déplacement le long des tubes : comment ? Où se trouve ici le lien de cause à effet, et de quelle manière un accroissement d'électrisation résulte-t-il d'une augmentation d'un nombre de lignes et de tubes de force, ayant leurs racines et prenant leur point d'appui sur la surface du conducteur ? S'il ne fallait voir dans une charge d'électricité qu'une extrémité d'un tube de tension, la notion concrète de la quantité positive et négative, répandue sur une portion de surface, ressortait mal d'actions qu'on localisait entièrement dans le milieu. La dissymétrie, qui existe entre les deux modes d'électrisation $+$ et $-$ et se marque si nettement dans la migration des ions et les chiffres de transport, les rayons cathodiques et anodiques des tubes à gaz raréfié, les aigrettes d'aspect différent dans l'air, les émissions et les décharges de signe préféré, la conductibilité dite unipolaire des flammes, etc., ne pouvaient être assignées à aucune cause. Quelques-uns cherchèrent la solution de ces problèmes dans les attaches qui lient la matière à l'éther, et ils avaient raison de le faire, car il y avait là une lacune : ils n'aboutirent qu'à forger quelques hypothèses de plus.

Certains faits semblaient irréductibles à la thèse. En particulier, l'électrolyse restait intraduisible en ce langage figuré, et son explication ne trouvait point de

placée dans le cadre d'une théorie, qui ne voulait connaître que des manières d'être ; il était difficile d'appuyer des déformations de l'éther sur des ions ; cette théorie ne correspondait pas mieux avec les faits révélés par les rayons cathodiques, anodiques, X et autres, et par les radiations α , β et γ , émanées des corps radioactifs et présentant tous les caractères d'une émission d'électricité.

En étudiant plus complètement les courants qui traversent les coupures pratiquées dans les conducteurs liquides et gazeux, on constata que les observations ramenaient invinciblement l'esprit à la considération d'une substance existant réellement, passant effectivement d'un bord de la coupure à l'autre, possédant une structure discontinue, dont les corpuscules représentaient individuellement une quantité élémentaire : cette considération n'avait pas échappé, nous l'avons déjà dit, à la clairvoyance de Maxwell et de Helmholtz ; mais ces maîtres n'eurent qu'une vision fugitive de cette constitution moléculaire, qui s'est révélée si clairement à nous au cours des dernières années.

Hittorf avait bien, dès 1869, en poussant le vide dans les tubes à gaz plus loin qu'on ne l'avait fait avant lui, acquis une idée assez juste du mécanisme des décharges à travers les gaz très raréfiés, et il avait signalé le phénomène de transport qui s'y manifeste. En perfectionnant la technique des tubes, Crookes fit un pas de plus vers la lumière, mais il était trop hypnotisé par la considération faradique de l'état radiant de la matière, et il commit la faute de rattacher trop étroitement les explications qu'il proposa à la théorie cinétique des gaz, alors dominante, et l'hypothèse du bombardement *moléculaire*, qu'il fit accepter, retarda l'interprétation exacte des apparences et le triomphe des idées vraies.

Giese fut mis dans la bonne voie par ses belles

études, de 1882, sur la conductibilité des gaz extraits des flammes ; c'est à ce savant que nous devons la notion nouvelle de la conduction électrique des gaz, qu'il n'attribue plus uniquement à un mouvement de leurs molécules (1) ; il fit mieux encore en appliquant la théorie électrolytique à la décharge électrique. « Les » électrolytes, écrivait-il, ont donné lieu jusqu'ici aux » suppositions les plus satisfaisantes pour expliquer le » mécanisme de la conductibilité ; on admet qu'avant » que le courant ne traverse le liquide électrolysable, » il y existe déjà des ions, des atomes ou groupes » d'atomes isolés, qui permettent la production d'un » courant en se déplaçant le long des lignes de force, » en portant avec eux des charges électriques. » C'est ainsi que les choses doivent se passer dans les gaz, Giese le déclarait formellement en 1889, et il faut reconnaître en lui un précurseur aux vues larges et lumineuses (2).

Schuster, Elster et Geitel, puis Arrhenius, développèrent heureusement ces idées (3) ; pour ces physiciens avisés, la question ne souffrait déjà plus aucun doute. Schuster faisait remarquer judicieusement que « croire » à un effort et à une déformation électrique n'est pas en » contradiction avec l'idée qu'il y a, dans l'atome, quelque » chose qui crée cet effort et qui peut être pris comme » la quantité d'électricité élémentaire », et il proclamait

(1) Giese, *Experimentelle Beiträge zur Kenntniss von Electricitaets Leitungsvermögen der Flammengase* ; ANNALEN DER PHYSIK UND CHEMIE, t. XVII, 1882 ; *Grundzüge einer einheitlichen Theorie der Electricitaets Leitung* ; *IBID.*, t. XXVII, 1889.

(2) Constatons toutefois l'existence d'un certain flottement dans les thèses de Giese ; il ne croyait pas que l'hypothèse corpusculaire, suffisante pour expliquer la conductibilité des électrolytes, fût applicable aux métaux conducteurs.

(3) La théorie des ions a rencontré au début, en France, il faut l'avouer, une médiocre faveur, de l'aveu de M. Lucien Poincaré (*La Physique Moderne*, page 305) ; le temps perdu a été regagné depuis lors, nous le verrons plus loin.

ainsi la possibilité d'un accord entre les théories de Maxwell et les vues nouvelles sur la constitution atomique de l'électricité (1).

Cet accord dont nous n'avons pas à faire ressortir l'importance, est surtout l'œuvre de MM. Lorentz et Larmor. Le premier montra que l'assimilation de l'onde d'éther avec une onde électromagnétique, conduisait à voir une sorte d'excitateur dans une molécule qui émet de la lumière; les mouvements du corpuscule électrique déplacé de sa position d'équilibre équivalent à des courants (2). M. Larmor, prolongeant la théorie électromagnétique aux relations de l'éther et de la matière, fit de celle-ci un assemblage de centres électriques (3) : tous deux mirent en évidence la notion précise de particules élémentaires électriques, qu'ils traitaient résolument d'entités substantielles.

A partir de ce moment le branle-bas était donné : l'étude plus approfondie des rayons de Röntgen et de Becquerel, de la radioactivité et du phénomène Zeeman apportait d'ailleurs des arguments décisifs à la thèse particulière. Parmi les travaux qui furent alors consacrés à la constitution granulaire de l'électricité, citons ceux de Lénard, de Wiechert et de Wien poursuivis dans les laboratoires allemands, et chez nous de MM. Jean Perrin, Villard et Langevin; mais une mention toute spéciale est due à Sir J. J. Thomson et à ses distingués collaborateurs de l'école de Cambridge,

(1) Schuster, *Décharges de l'électricité dans les gaz*; PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON, tome XLXII, 1890; une traduction de ce mémoire anglais a été donnée dans le recueil publié par la Société de Physique, sous ce titre : *Les quantités élémentaires d'électricité, Ions, Electrons, corpuscules* (Paris, Gauthier-Villars, 1905).

(2) Le premier mémoire de M. Lorentz a paru en 1892, dans les ARCHIVES NÉERLANDAISES : *La Théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants*.

(3) Larmor, PROCEEDINGS, 1894. L'éminent physicien a réuni ses principales publications dans son ouvrage, *Ether and Matter* (Cambridge, University Press, 1900).

MM. Rutherford, C. T. R. et Harold Wilson, Townsend, Millikan, Kirkby, Hurst, etc., dont les noms reviendront souvent sous notre plume. Citons enfin en 1899, une étude originale de M. Drude sur la conductibilité des métaux (1).

Le siècle expirant léguait à son successeur une œuvre commencée, pour laquelle on avait déjà réuni de nombreux matériaux ; les fondations étaient jetées et assises sur un bon fond ; on connaissait le plan de la construction qu'elles allaient porter, on savait quel style serait suivi, et l'on devinait l'édifice dans ses grandes lignes : mais on n'ignorait pas qu'il faudrait beaucoup de temps et de grands efforts pour couronner son faite et le rendre habitable.

Au Congrès international de physique, tenu à Paris, en 1900, lors de l'Exposition, une dizaine de rapports furent présentés, qui touchaient plus ou moins aux nouvelles théories sur l'Electricité (2) ; leur lecture permet de constater qu'elles avaient déjà conquis leur place au soleil, mais cette place leur était encore assez parcimonieusement mesurée. Toutefois, à partir de ce moment, elles allaient accaparer presque entièrement l'attention des chercheurs, et le grand public était saisi de la question par d'importants articles, mémoires et conférences de haute vulgarisation, publiés dans toutes les langues. Impossible de mentionner tous ces écrits ; nous n'en signalerons que quelques-uns, qui nous paraissent avoir exercé une influence plus considérable sur la marche des idées, ce sont : *Die Entwicklung*

(1) Drude, *Zur Elektronentheorie der Metalle* ; ANNALEN DER PHYSIK, nouvelle série, tome I, page 566.

(2) RAPPORTS PRÉSENTÉS AU CONGRÈS INTERNATIONAL DE PHYSIQUE, réuni à Paris, sous les auspices de la Société française de physique ; 3 vol., Paris, Gauthier-Villars, 1900. Les rapports auxquels je fais allusion dans le texte portent les signatures d'Arrhenius, Drude, Exner, Lorentz, H. Poincaré, Righi, J. J. Thomson, Villard et Villari ; 77 rapports avaient été présentés au Congrès.

des Elektrons Begriffs, de Kaufmann (1) ; *Les hypothèses moléculaires* de J. Perrin (2) ; *Die Principien der Dynamik des Elektrons*, par Max Abraham (3) ; *La physique des Electrons*, par Langevin (4) ; *La théorie moderne des phénomènes électriques*, par Righi (5) ; *Sur les électrons*, par Sir Lodge (6) ; *La théorie corpusculaire de l'électricité*, de Drumaux (7) ; *Les idées modernes sur la constitution de la matière*, série de conférences faites à la Société de physique, en 1912 (8).

Tous les traités didactiques de physique consacreront désormais un ou plusieurs chapitres à la théorie de l'Electron, qui a pris le nom d'*Electronique*. Quelques auteurs, à l'imitation de M. Chwolson, sont éclectiques au point de conserver une place à la fois aux trois images des fluides de Coulomb, du milieu actif et passif de Faraday et des atomes d'électricité ; ils ne font usage de la dernière, qui est « encore trop à l'état d'ébauche » « qu'aux endroits où elle présentera des avantages très marqués sur les autres théories » (9) ; ils se tiennent sur une prudente réserve, en faisant observer que « chaque jour peut changer essentiellement la face de la question, et conduire à l'éclair-

(1) PHYSIKALISCHE ZEITSCHRIFT, 1^{er} octobre, 1901 ; à ma connaissance, ce travail n'a pas été traduit en français.

(2) REVUE SCIENTIFIQUE, 13 avril 1901.

(3) ANNALEN DER PHYSIK, t. X, 1903, p. 105. M. Langevin en a donné une traduction dans *Ions, Electrons*, t. I, p. 1.

(4) REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES, 30 mars 1905.

(5) Traduction Neculcéa ; édité par l'ECLAIRAGE ÉLECTRIQUE, Paris, 1906 ; préface de M. Lippmann.

(6) Traduction Nugues et Peridier ; Paris, Gauthier-Villars, 1906.

(7) Paris, Gauthier-Villars, 1911 ; préface de M. E. Gérard.

(8) Ces conférences, au nombre de 10, ont été faites par MM. J. Perrin, Langevin, Bauer, Bloch, Blanc, Dunoyer, M^e Curie, MM. Debiérne, Weiss et Henri Poincaré ; cette dernière, qui est le couronnement des autres, est intitulée *Les rapports de la matière et de l'éther*. Ces conférences forment un fort volume in-8^o de 370 pp., imprimé chez Gauthier-Villars, Paris, 1913.

(9) Chwolson. — T. IV, 1^{er} fasc. p. 11, et t. V, 1^{er} fasc. ; ce fascicule porte la date de 1914.

cissement et à l'affermissement de ce qui apparaît encore obscur et chancelant à l'heure actuelle ». D'autres auteurs partagent le même sentiment de retenue vis-à-vis de la théorie corpusculaire, mais ne l'expriment pas : ils exposent la doctrine en laissant aux initiateurs la responsabilité de leurs thèses ; ils la défendent, en produisant des arguments auxquels ils laissent leur signature. Quelques-uns vont plus avant dans l'inconnu et ne croient pas se compromettre. Quoi qu'il en soit de ces attitudes diverses, on peut renvoyer utilement le lecteur désireux de se faire une opinion aux suppléments que M. Bouty a donnés à la *Physique* de Jamin (1), aux nouvelles éditions du *Cours d'Electricité* de Pellat (2) et des *Leçons de Physique* de Chappuis et Berget (3), au *Cours de Physique générale* de M. Ollivier (4), à la *Physique moderne* de M. Lucien Poincaré, déjà citée, et aux plus récents ouvrages, ayant la physique générale ou l'électricité pour objet.

Un professeur allemand, M. Graetz, de l'Université de Munich, a été plus résolument de l'avant, et il a écrit un *Traité*, basé sur la notion de l'électron ; plus clair qu'on ne s'y attendait, il est moins complet qu'on ne l'eût désiré. M. Léauté, qui avait présenté la traduction du livre aux lecteurs français, a loué l'initiative de l'auteur, en rappelant « le mystère que le sujet comporte encore » (5). M. l'abbé Tillieux a pénétré plus profondément au cœur de la question (6) ; je ne sais

(1) Paris, Gauthier-Villars, diverses dates.

(2) Paris, Gauthier-Villars, 1908 ; le t. III porte en sous-titre les mots : Ions et Electrons.

(3) Paris, Gauthier-Villars.

(4) Paris, librairie scientifique Hermann et fils, 1913 ; le t. I consacre sa cinquième partie à *l'Electron et les Ions*, pp. 517 à 673.

(5) Graetz. *L'électricité et ses applications* ; traduction Q. Tardy, faite sur la 15^e édition allemande ; préface de A. Léauté. Paris, Masson et C^{ie}.

(6) J. Tillieux, *Essai d'un Traité élémentaire de Physique*, selon les théories modernes ; 3^e édition, Paris, Béranger, 1921.

si son remarquable ouvrage verra les 15 éditions du livre allemand, mais il les mérite mieux que lui et devrait être traduit dans toutes les langues alliées.

La doctrine moléculaire a conquis droit de cité dans la science électrique. Ce n'est point à dire qu'elle s'impose de tous points à notre adhésion, mais elle repose sur le roc de constatations définitives et présente de ce chef un progrès indiscutable sur les doctrines admises précédemment.

L'image, pour employer l'expression de M. Chwolson, n'est pas encore identique à la réalité objective, cela ne fait l'objet d'aucun doute, mais elle présente avec elle un trait fondamental de ressemblance, qui est fixé et qu'elle ne perdra plus. Pour le reste, l'ensemble est peut-être plus logique et plus harmonieux que fidèle.

Ce n'est pas une statue coulée en fin métal d'un seul jet et d'une pièce : elle est formée de parties assemblées et ajustées avec art, mais d'une inégale valeur intrinsèque, de résistance différente, qui braveront plus ou moins victorieusement les morsures de la critique et du temps ; toutefois l'œuvre n'a pas de pieds d'argile, et il ne suffira pas du choc d'une pierre roulante pour la coucher sur le sol.

Les granules d'électricité, dont on est parti, ne sont plus une vaine fiction, plus ou moins justifiée par la commodité de son emploi, un *objectum quo* recommandé uniquement par l'économie intellectuelle qu'il procure, un utile procédé de classification et de mnémotechnique. Ils ont une existence individuelle, dûment établie, à titre d'élément dernier dont nous ne connaissons pas encore de sous-multiples.

Ils nous fournissent la notion directe et immédiate d'une quantité, d'une charge : leur accumulation, leur distribution et leur mouvement dans les corps déterminent les propriétés de ceux-ci. L'éther, celui de Faraday et de Maxwell, continu physique remplissant

l'espace électromagnétique, pénétrant tous les corps, identique en ceux-ci à ce qu'il est dans le vide, subit leurs actions et les transmet ; mais il ne joue plus qu'un rôle d'intermédiaire, attendu que les granules sont les points de départ et d'arrivée des actions.

La notion d'un courant convectif ressort directement du mouvement des granules : il n'y a pas lieu de faire aucune différence entre l'effet de leur mouvement propre, à l'intérieur d'un corps en repos, et de leur mouvement de transport par un corps qui les entraîne avec lui dans sa course. Le déplacement des granules, au sein d'un diélectrique, produit des effets analogues à ceux d'un courant dans un conducteur.

Un aimant modifie la forme de leur trajectoire.

Tout rayonnement ondulatoire est à rapporter à leurs vibrations. Un granule à vitesse variable, devient le centre d'un rayonnement à chacun de ses changements de vitesse ; il fonctionne à l'instar d'un excitateur et engendre des ondes électromagnétiques.

Chaque particule a sa période de vibration, qui dépend de sa masse et de ses attaches. Une radiation incidente fait vibrer par son choc l'élément électrique, et celui-ci entraîne dans son mouvement l'atome auquel il est lié. Cet entraînement est d'autant plus facile que la période de vibration naturelle de l'atome est plus voisine de celle de la radiation reçue. Il y a cession d'énergie de la part de l'onde et transformation ultérieure.

On expliquera de la sorte les phénomènes d'absorption et de dispersion. L'effet exercé par un aimant sur la valeur de la période du granule se manifeste par l'influence du champ sur les radiations et donne la raison des actions électro- et magnéto-optiques.

Telles sont les idées-mères de l'Electronique, le *leit-motiv* de sa doctrine générale. Il était nécessaire d'en tracer les lignes directrices, avant d'en commencer

l'étude et de s'engager dans ses détails. Le visiteur d'une ville, avant de s'enfoncer dans le dédale de ses rues, gravit d'abord un point élevé, d'où son regard embrasse la vaste étendue des constructions ; ce n'est qu'après avoir décomposé l'agglomération en un certain nombre de secteurs, dont il a reconnu la physiologie particulière, qu'il tracera le programme de ses pérégrinations. Nous avons acquis de même une notion d'ensemble du vaste et riche domaine qui s'ouvre à nos explorations et nous pouvons en dresser le plan.

Ce qu'il nous faudra établir, c'est la réalité de l'existence matérielle de l'électricité et de sa constitution granulaire ; elle affecte la forme de particules, que nous dénombrerons, dont nous déterminerons la masse et la charge, en essayant de nous en représenter la constitution intime et en montrant de quelle manière elles se prêtent à la construction d'une théorie nouvelle de l'électricité, de la théorie électronique. Ce faisant, nous aurons rempli la tâche que nous nous étions proposée dans ce travail.

L'hypothèse de la dissociation électrolytique d'Arrhenius avait donné la clef des phénomènes d'électrolyse : une décomposition plus ou moins complète de la substance électrolysable préexiste au passage du courant ; les molécules ne sont pas séparées en ions par le courant, elles le sont déjà par le fait même de la dissolution, dans un solvant à grand pouvoir inducteur spécifique. Les molécules sont scindées en deux atomes ou groupes d'atomes possédant des charges égales, mais de signe contraire. La charge par valence d'ion est une quantité fixe et invariable e , égale à $1,4 \cdot 10^{-20}$ U. E. M. ou $4,1 \cdot 10^{-10}$ U. E. S. Chaque atome porte cette charge, une fois, deux fois, trois fois ; nous n'en connaissons que des multiples entiers et pas de sous-multiples. Ces ions, rendus libres par la dissolution, errent dans le liquide, s'y heurtent et s'y brisent, et se

recombinent avec leurs débris ; malgré ces unions et ces désunions incessantes, le nombre des molécules dissociées ne varie pas, tant que le degré de dilution ne change pas. Le liquide se trouvant en cet état, qui est un état d'équilibre, est dit *ionisé* et nous savons bien ce que ce mot veut dire : sa fortune a été grande, parce qu'il est clair, et qu'il représente une idée dont nous voyons les résultats. Nous nous représentons ce qui se passe quand on plonge dans le bain ionisé deux électrodes conductrices + et —, le cheminement inverse des ions avec leurs charges et leur neutralisation, quand ils arrivent au terme de leur excursion. Au moment où la charge est cédée à l'électrode, elle se trouve momentanément sans support : cela ne s'entendrait pas d'une manière d'être ou d'une déformation de l'éther. Ce quelque chose qui se porte de l'ion à l'électrode, nous apparaît, avec une individualité propre ; son existence est aussi réelle que celle de l'atome matériel qu'il vient de quitter ; il est aussi indivisible et aussi insécable que lui. L'électricité qui se sépare ainsi de l'ion, c'est une particule, un grain, un granule, disons le mot, c'est l'atome d'électricité : « cette unité naturelle, écrivait sir Lodge, dès 1886, » dans ses *Modern Views on Electricity*, est appelée » avec raison un atome d'électricité, attendu qu'en » dessous d'elle nous ne connaissons rien. »

Le transport de ces atomes entre les électrodes constitue le courant, qui est un phénomène de convection. *A priori* on serait porté à y voir un double mouvement des quantités + vers la cathode, — vers l'anode, mais on peut admettre aussi qu'il n'y a qu'un mouvement des quantités négatives vers l'anode. Voici pour lors comment nous nous représentons le phénomène. L'ion négatif serait le seul qui puisse se dépouiller de sa charge ; il apporterait à l'anode et y déposerait son granule d'électricité : du côté opposé au contraire, l'ion

positif ne céderait rien à la cathode, mais il en recevrait un granule. En d'autres termes, l'ion négatif se neutraliserait par perte de sa charge, alors que l'ion positif le ferait par acquisition d'une charge de signe contraire à la sienne. Au demeurant, il n'y aurait que des granules électriques négatifs, qui soient à l'état de liberté, et qui passent d'une molécule à l'autre. Ces granules, ces atomes négatifs d'électricité, ce *substratum*, dont l'existence n'est plus douteuse pour nous, c'est la chose à laquelle nous réservons le nom d'*Électron*, mis en usage par Stoney.

Lorsque désormais nous parlerons d'électrons, nous aurons uniquement en vue cette charge négative e , indivisible, seule libérable, neutralisant une molécule par sa présence, laissant derrière elle, après son départ, un ion positif de même quantité. L'électrisation positive ne serait donc pas attribuée à la présence d'un second substratum différent du premier, mais à la soustraction d'un nombre déterminé d'électrons. Le mot d'ion positif (nous dirons ion tout court, comme nous dirons électron tout court) revêt ainsi un sens nouveau, très spécial, bien défini ; il ne faut pas le confondre avec l'ion électrolytique de Faraday.

L'électronique est la théorie de l'électricité, fondée sur les considérations que nous venons d'exposer : elle repose sur le fait de l'existence d'un atome électrique.

Ce concept atomique de l'électricité a donc surgi très naturellement de l'étude de l'électrolyse, qui nous a fourni l'image la plus compréhensive de la conductibilité électrique des liquides.

Mais l'électrolyse ne nous a servi que d'entrée en matière : la méthode, à laquelle elle nous a initiés, peut être développée et perfectionnée ; elle nous permettra de préciser nos précédentes conclusions, tout en les basant sur des fondements moins hypothétiques. Elles ont été formulées avec une netteté, qui ne laisse plus

grand'chose à désirer. L'électron va nous apparaître à l'état libre, existant par lui-même, sans support matériel nécessaire, à l'état libre, possédant une individualité propre, au point de servir de noyau à une masse de matière ; on ne pourra plus lui refuser une réalité objective. Nous nous trouverons en présence d'un fait, non plus d'une image ; la structure granulaire sera établie par des preuves directes.

○ Ces preuves sont multiples et de diverse nature.

○ Les premières dans l'ordre chronologique, sinon logique, reposent sur la faculté que possèdent les gaz de conduire un courant. Nous commencerons par elles.

○ En leur état naturel et normal, les gaz sont de très médiocres conducteurs de l'électricité ; mais l'intervention de certaines énergies étrangères peut leur communiquer à un haut degré cette propriété de conduire : on énonce ce résultat en disant que les gaz sont *ionisés*, en empruntant l'idée et le mot aux études électrolytiques exposées ci-dessus. On admet en effet que, dans les gaz, les choses se passent comme dans un liquide électrolytable. Leur conductibilité est due à la présence d'électrons libres et aux mouvements dirigés qu'ils prennent sous l'action des forces électriques. L'ionisation produit les mêmes résultats que la dissolution : elle divise en ions $+$ et en électrons $-$ un certain nombre des atomes ou molécules du gaz.

○ Ce ne fut d'abord qu'une hypothèse ; mais cette hypothèse, qui imagine une convection correspondant à un mouvement de particules électriques au milieu des molécules matérielles, expliquait très simplement et sans difficulté les faits connus ; en voici un entre beaucoup d'autres, que nous interpréterons pour exemple. Faisons passer un gaz ionisé entre deux conducteurs parallèles chargés de signe contraire comme le sont des armatures de condensateur, ou bien forçons-le à traverser un tampon de coton ou des tubes

capillaires, ou bien encore faisons-le barboter dans un liquide conducteur, et nous constaterons que le gaz a perdu sa conductibilité ; c'est que les conducteurs, la matière du tampon, la paroi des tubes, la surface des bulles dans le liquide ont retenu les particules d'électricité par attraction ou par adhésion ; le gaz en a été dépouillé, de même qu'on l'eût débarrassé par filtrage des poussières et des corps étrangers.

La manière spéciale dont un gaz ionisé transmet un courant électrique est en parfait accord avec notre hypothèse. Formons en effet un circuit composé du condensateur employé ci-dessus, d'une pile constante et d'un électromètre, et ionisons l'air compris entre les deux armatures : l'intensité du courant qui passe et que mesure l'électromètre témoigne de la conductibilité acquise par l'air et permet d'apprécier ses variations. Or, cette conductibilité présente une particularité déconcertante de prime abord : elle ne suit pas la loi d'Ohm. En effet, augmentons le voltage de la source, toutes choses égales d'ailleurs ; l'intensité du courant qui passe devrait augmenter proportionnellement à la différence de potentiel établie entre les armatures ; or, il n'en est rien. Bien plus, cette différence de potentiel croissant de plus en plus, la conductibilité croît de moins en moins, et elle finit par atteindre une valeur limite, dite limite de *saturation*. Aucune théorie antérieure ne permettait d'expliquer ce phénomène : mais notre hypothèse aurait pu le faire prévoir ! Il y a une limite supérieure à la conductibilité, une limite de saturation, parce qu'à un moment donné l'ionisation est achevée, par manque de nouveaux éléments à dissocier et parce qu'il n'y a plus d'ions disponibles. L'explication est aussi simple qu'elle est rationnelle et péremptoire : on ne saurait du reste en trouver aucune autre.

Mais voici qui est mieux encore : l'observation est

due à MM. Righi, J. J. Thomson et Rutherford ; elle remonte à l'année 1896. Écartons les armatures du condensateur de l'expérience précédente, *aliis non mutatis* ; la longueur du circuit résistant croît, l'intensité du courant devrait diminuer ; au contraire, elle augmente. Pourquoi ? En augmentant la distance qui sépare les armatures, on a fait croître le volume de la masse d'air ionisé intéressé au phénomène ; le nombre d'ions a par suite été multiplié et le courant de saturation a crû du même coup.

Combien d'autres phénomènes d'apparence mystérieuse ou paradoxale perdent leur étrangeté, quand on se représente que la conductibilité spéciale du gaz est due à la présence de particules électriques qui se glissent et se fauflent entre les molécules, se heurtent contre elles, s'y brisent, pour se recombinaison l'instant d'après, sans que leur nombre dépasse une certaine limite en rapport avec l'influence ionisante : on comprend l'impossibilité d'extraire d'un gaz plus qu'une quantité déterminée d'électricité, quelle que soit l'intensité du champ que l'on fait agir ; on conçoit que la conductibilité, développée par l'ionisation, disparaisse, quand cesse de s'exercer la cause libératrice des électrons, par suite de recombinaisons progressives des électrons avec les molécules dont ils ont été détachés ; le nombre des éléments libres subit, au cours de leurs collisions, la loi du temps.

Déplacez une masse d'air ionisé, sa faculté conductrice l'accompagne ; ionisez une masse en un seul point, les électrons se diffuseront dans tout l'espace qu'elle occupe, et la conductibilité gagnera toute son étendue, alors même que l'enceinte qui la renferme serait divisée en compartiments par des cloisons ; pourvu que celles-ci soient percées de quelques trous, par lesquels ces granules trouveront le moyen de passer, ainsi que M. Schuster l'a démontré.

Ce physicien appartient à cette célèbre école de Cambridge, formée et dirigée par M. J. J. Thomson, à laquelle nous sommes redevables de si nombreuses expériences, aussi remarquables par la science qui les a inspirées que par l'ingéniosité et l'habileté qui ont permis de les mener à bonne fin.

Parmi celles-ci nous placerons en premier rang les recherches de MM. Harold et C. T. R. Wilson, qui ont fait voir et permis de dénombrer ces particules, en observant certains phénomènes de condensation de la vapeur d'eau dans l'air ionisé : au témoignage de Sir Lodge, « c'est une des études les plus brillantes qui » aient été poursuivies en ces dernières années dans le » domaine de la physique expérimentale » (1); nous ne contredirons pas cet éloge, qui n'est pas exagéré.

Développant les idées de nos compatriotes Gernez et Coulier, M. Aitken avait fait, en 1880, une curieuse découverte : le brouillard a besoin, pour se former, de trouver dans l'air des noyaux solides qui servent de germe et de centre à ses vésicules ; il ne se produirait qu'une légère condensation de vapeur dans une atmosphère parfaitement pure et totalement purgée de poussières, et le point de rosée n'y apparaîtrait pas, l'espace fût-il même sursaturé de vapeur ; mais l'introduction de particules solides y amorce incontinent une condensation. En dépouillant l'air plus ou moins entièrement des poussières folles qu'il renfermait, par une suite de filtrages répétés à travers des tampons d'ouate, M. Aitken a montré que le brouillard, après avoir présenté d'abord l'apparence de celui de Londres, finit par l'opacité légère que les Anglais vont admirer dans l'atmosphère limpide des lacs d'Écosse. (2)

(1) Lodge, *loc. cit.*, page 106 : « il ne faudrait pas beaucoup nous pousser, ajoutait-il plus loin, pour nous faire biffer les mots, en ces dernières années. »

(2) Le mémoire de M. Aitken publié dans les TRANSACTIONS d'Edimbourg, portait le titre significatif de *Dust, Fogs and Clouds* : Poussières, brouillards et nuages.

M. C. T. R. Wilson avait étudié cet intéressant phénomène en 1897, et il avait cherché à établir quelle détente adiabatique (c'est-à-dire accompagnée de refroidissement) était nécessaire pour donner lieu à une condensation sensible dans un air débarrassé de poussières, sursaturé au degré 8, ce qui signifie que la densité de sa vapeur est 8 fois celle de la vapeur saturante, dans les mêmes conditions ; il constata que le rapport du volume final de détente au volume initial pouvait atteindre 1,38 sans que le brouillard y fût visible ; il devenait très dense pour une détente légèrement supérieure.

Or, des considérations théoriques avaient conduit M. J. J. Thomson à déclarer qu'une charge électrique devait favoriser la condensation (1) ; M. Wilson fut amené ainsi à observer la détente d'un gaz ionisé, et il découvrit qu'un gaz sursaturé au degré 4, subissant une détente 1,25, était envahi par un épais brouillard. Des électrons provoquent donc une condensation dans les gaz, à l'instar de ce qu'y opèrent des poussières solides. De là à affirmer que l'électricité présente une structure granulaire, il n'y avait qu'un pas à faire : M. Wilson ne le laissa pas faire à d'autres, et il procéda sans tarder à une contre-épreuve décisive. Par l'introduction de conducteurs électrisés, il est possible d'éliminer les électrons d'une région d'un gaz et de les refouler dans une autre : or, d'un côté, l'apparition du brouillard est retardée au point d'y être presque supprimée, alors que de l'autre il se produit une condensation abondante.

(1) Lord Kelvin avait d'abord démontré que la tension superficielle d'une très fine gouttelette est telle qu'elle ne pourrait conserver l'état liquide, mais que la tension opposée déterminée par l'électrisation en retarde la vaporisation. M. J. J. Thomson a développé cette théorie et il a prouvé que la charge naturelle de l'électron suffisait pour qu'un sphérule atomique échappât à la vaporisation. L'étude de Wilson a paru dans les *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS* sous le titre *Condensation of Water Vapour in the presence of dust-free air and other gases* ; année 1897.

L'expérience suivante permet de faire constater à une nombreuse assemblée la condensation que provoquent les électrons. Projets sur un écran l'ombre d'un jet de vapeur qui s'échappe du col effilé d'un ballon dans lequel on fait bouillir de l'eau : si la vapeur est bien sèche et que nous employions un puissant foyer de lumière, le jet est presque invisible et il marque à peine sur la blancheur de la toile la trace de son passage. Mais que l'on y introduise un conducteur terminé en pointe, et qu'on en fasse jaillir une aigrette d'électricité négative, et voici qu'aussitôt il se forme dans l'air un épais panache de fumée blanche et un nuage opaque dessine une ombre noire dans la projection. Il est aisé de constater que son opacité croît avec l'intensité du flux d'électricité s'écoulant de la pointe, comme si le nombre de gouttelettes condensées était égal au nombre de grains d'électricité, qui ont provoqué l'apparition du phénomène.

Plus récemment, M. Wilson a même réussi à suivre au sein d'une vapeur l'effet condensant d'un électron traversant sa masse : il a montré et photographié la trajectoire d'un rayon ionisant, lancé dans un air humide subitement détendu et aussitôt illuminé par une étincelle provenant de la décharge d'une forte batterie de jarres ; on la fait éclater dans un tube de quartz, rempli de mercure, à l'effet de lui donner un énergique pouvoir actinisant. Chaque électron libéré s'entoure d'une gouttelette liquide, qui devient un point brillant au sein du nuage de condensation : ces points sont trop rapprochés pour être vus distinctement ; mais ils dessinent des traînées lumineuses, très fines, extrêmement nettes et brillantes, qui se prêtent bien à la photographie. Le mémoire de M. Wilson reproduit un certain nombre de ses clichés, pris dans des conditions diverses : ce sont de véritables bouquets de feux d'artifice ; on croirait assister à un tir de nuit à boulets rouges et l'on

ne peut se soustraire à l'impression qu'on a vu de ses yeux une émission de particules électriques (1).

Aucune difficulté ne rebutait les physiciens du laboratoire Cavendish de Cambridge : entraînés par leur éminent directeur J. J. Thomson, ils ont eu toutes les audaces, et on les a vus entreprendre de compter les gouttes d'eau et de mesurer leur diamètre : et ils y ont réussi ! Wilson, partant du fait que ces gouttes doivent avoir une grosseur uniforme, observait d'abord un point lumineux à travers le brouillard et il mesurait les rayons des anneaux de diffraction (2) ; mais le procédé ne pouvait conduire à des résultats exacts, et on l'abandonna, pour s'arrêter à la méthode que voici. Soit à dénombrer les électrons contenus dans une certaine masse d'air saturée de vapeur d'eau, sous une température et une pression connues. On produira la détente 1,28, pour laquelle tous les électrons sont certainement devenus des noyaux de condensation ; un brouillard se formera ; chaque électron donnera une goutte. Celles-ci tombent toutes ensemble, puisqu'elles sont identiques entre elles, et l'on peut suivre toutes les phases de la chute, en maintenant le regard fixé sur la partie supérieure, nettement définie, comme elle l'est pour un brouillard d'automne, qui se rassemble au fond d'une vallée : la vitesse du mouvement du plan supérieur du nuage correspond à la vitesse individuelle de chute des vésicules dont il se compose. Un calcul élémentaire donne la masse totale de la vapeur constituant le brouillard : il suffit de connaître la température de l'air et sa

(1) Ce remarquable et très intéressant travail a été publié, en 1912, dans les PROCEEDINGS de la Société Royale de Londres, sous le titre : *Description d'un appareil de détente permettant de rendre visibles les trajectoires des particules ionisantes dans les gaz et de quelques résultats, obtenus par son emploi*. Il a été reproduit avec ses planches de clichés dans le JOURNAL DE PHYSIQUE en 1913, page 529.

(2) L'ériomètre de Young et l'appareil de Delezenne donnent les diamètres des globules en fonction des rayons des anneaux.

pression avant et après la détente et le degré de cette détente (1). Si nous pouvions connaître le volume de la sphérule et par suite sa masse, nous aurions le moyen de déterminer le nombre des sphérules d'eau précipitées : or la loi connue de Sir Stokes permet de déduire de sa vitesse de chute le rayon d'une sphère, tombant en chute libre dans un air de viscosité déterminée (2). Cette numération des gouttes a été effectuée par M. J. J. Thomson : il a trouvé qu'en certaines expériences le nombre des gouttelettes formées pouvait se monter à près de 100.000 au centimètre cube ; la masse d'eau qui les formait ne dépassait pas un deux-centième de milligramme et le rayon des gouttes était de l'ordre du micron (millième de millimètre).

Il vint alors à l'esprit de M. J. J. Thomson et de ses élèves Wilson, Millikan, Roux, etc., une de ces idées qui illustrent un physicien, quand il réussit à les mettre à exécution. Ces gouttes, se dit-on, constituées par la robe liquide d'un centre électrique, portent le signe de ce centre et subissent comme lui l'action d'un champ électrostatique ; que le brouillard s'abatte dans un champ vertical, sa chute sera accélérée ou retardée, suivant la direction du champ et le signe de l'atome

(1) Soient t la température de l'air avant la détente et t' la température finale après la condensation de la vapeur, à la suite de la détente n , de l'abaissement de température qui en est d'abord résulté et du réchauffement consécutif au changement d'état de vapeur en eau ; on trouve dans les tables les poids de vapeur contenus dans un centimètre cube d'air aux températures t et t' ; appelons-les π et π' . Le poids condensé est donné par la différence $\frac{\pi}{n} - \pi'$.

(2) En 1849, Sir Stokes avait étudié la chute de sphères solides dans un fluide visqueux sous l'action de leur poids : la vitesse ne tarde pas à atteindre une valeur limite à laquelle la résistance visqueuse équilibre l'action de la pesanteur ; cette vitesse est pour lors constante, et elle est fonction de l'excès de densité des sphères sur celle du milieu et de leur rayon. Cette relation, pour une goutte d'eau dans l'air, affecte la forme $r = \frac{q\sqrt{v}}{10^4}$, r étant le rayon et v la vitesse en centimètres par seconde. Celle-ci est de l'ordre d'un dixième de centimètre (1 millimètre) par seconde.

électrique : on organisa donc une expérience dans le but d'obtenir un ralentissement dans la chute. Le résultat répondit aux prévisions ; le laboratoire Cavendish remportait un nouveau triomphe.

M. Millikan opéra ensuite sur des gouttelettes d'huile, formées par pulvérisation, et électrisées par le fait (1) ; M. Roux fit mieux encore en observant la chute de sphérules solides, dont les mouvements sont plus simples, et il les fit tomber au sein d'un liquide ; il employait des particules de soufre dans du xylol saturé (2) ; en recourant à un éclairage latéral, on les voyait constituant des points brillants dans le champ d'une lunette-viseur à oculaire micrométrique. On arrivait à régler si bien leur chute et à la modérer de telle façon qu'on les conservait pendant des heures dans le champ du viseur : c'était une question d'intensité de champ. Soient en effet H l'intensité de ce champ, E la charge de la goutte, m sa masse, w et w' les vitesses de chute, sous l'action de la seule pesanteur, puis sous cette action et celle du champ ; il n'y a qu'à écrire que les vitesses sont proportionnelles aux forces $\frac{w}{w'} = \frac{m g}{m g - H E}$ et l'on voit comment w' dépend de H .

Mais cette équation a une portée beaucoup plus grande qu'il ne paraît d'abord : en effet, de la connaissance de m et de H , et de l'observation des deux vitesses w et w' , on peut déduire la valeur de E ; et cette charge (quelle admirable concordance !) est toujours un multiple entier de la charge e de l'atome monovalent, qui nous avait déjà présenté en électrolyse le

(1) M. Millikan a résumé l'ensemble de ses travaux dans un article de la *PHYSIKALISCHE ZEITSCHRIFT*, tome XI, 1910. Les gouttelettes d'huile qu'il observait avaient un diamètre de 3 à quelques dizaines de microns ; l'intensité des champs variait d'une expérience à l'autre ; la différence du potentiel entre les armatures n'était pas inférieure à 3000 et ne dépassait pas 8000 volts.

(2) Roux, *Charge de l'électron* ; *COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES*, 1911, 1^{er} semestre, page 1168.

caractère d'une constante universelle (1). Ce caractère, la charge e le possède désormais à nos yeux d'une façon indéniable, car sa valeur est toujours la même, quel que soit le gaz ou le liquide au sein duquel la sphérule se précipite, et quelles que soient la dimension, la masse, la forme ou la nature de cette particule. Parfois, il est vrai, au milieu d'une observation, tout d'un coup, sans cause connue, sans que rien ne le fasse prévoir, la vitesse change brusquement ; que l'observateur ne s'en trouble pas ; qu'il mesure avec soin la nouvelle vitesse ; notre équation lui apprendra qu'alors la charge E a augmenté ou diminué, non pas d'une quantité quelconque, mais qu'elle a gagné ou perdu une, deux, trois ou n fois la valeur de e . C'est le granule qui s'est annexé ou qui a laissé échapper des électrons. La variation ne procédant jamais par fraction de e , il faut croire que e est indivisible, et insécable, comme l'atome d'autrefois.

Les conséquences que nous déduisons de ces expériences s'imposent aux esprits les plus positifs et les plus circonspects : « Nous concluons, disait M. Langevin, » en 1912, à l'existence certaine du grain d'électricité » et de plus à son identité dans les électrolytes et dans » les gaz conducteurs » (2). La profession de foi était catégorique : aucun physicien n'a protesté, et pour cause.

C'est qu'en effet de nombreux arguments, non moins décisifs, d'une saisissante convergence, sont venus confirmer et mettre au-dessus des doutes pragmatistes cette notion de l'électron, constituant un individu dont la charge négative est indivisible, comme il l'est lui-même.

L'étude des tubes à vide va nous le faire voir, détaché de la matière dans son isolement, et se manifestant à nous avec ses propriétés caractéristiques.

(1) En unités pratiques cette charge est de 40 sextillionièmes de coulomb.

(2) Loc. cit. : *Les grains d'électricité*, page 57.

Maxwell avait prédit que les décharges à travers les gaz jetteraient « une grande lumière sur la nature de l'électricité » (1) ; il se basait sur ce que la coupure du courant dans un fluide gazeux permettait mieux que la coupure dans un liquide, de suivre les phénomènes dans leur développement et d'analyser leurs particularités. Les gaz sont des édifices moléculaires bâtis sur un plan plus simple et plus uniforme. Le bénéfice résultant d'une moindre complexité du milieu était immédiat ; on évitait de plus certaines actions secondaires, masquant souvent les actions principales. Enfin, la théorie cinétique apportait à ces études le concours de ses représentations suggestives, connues de tous, de ses calculs de vitesse et de longueur du chemin moyen des molécules et de ses statistiques.

Pour que ce concours devînt réellement utile, il eût fallu ne s'inspirer que des grandes lignes du modèle, sans s'y asservir trop entièrement ; il eût convenu d'autre part de ne pas trancher des questions dont l'étude expérimentale ne faisait que débiter. Il était logique d'attribuer l'énergie des rayons cathodiques à un phénomène de convection ; mais qu'est-ce qui se mouvait ? L'hypothèse d'un bombardement effectué par les molécules mêmes du gaz, électrisées au contact de la cathode, puis repoussées par elle, voyageant avec une vitesse de quelques centaines de mètres (la vitesse de la théorie cinétique) variable d'un gaz à l'autre, suffisait pour expliquer les premières apparences ; mais il ne fallait pas la serrer de trop près. Elle donnait la raison d'une déviation des rayons cathodiques par un conducteur électrisé ou par un pôle d'aimant, mais rien ne faisait prévoir que cette déviation serait la même dans n'importe quel gaz, comme on le découvrit bientôt. Reconnue inutile, puis insuffisante sur de

(1) Maxwell, loc. cit. : *Traité*, page 65.

nombreux points, gênante en d'autres, la théorie de Crookes perdit la confiance de ses adhérents les plus convaincus et elle fut généralement délaissée.

Wiedemann, Jaumann, Goldstein et d'autres physiciens allemands, auxquels Hertz et Lénard apportèrent l'autorité de leur savoir et de leur nom, s'étaient montrés dès le début réfractaires aux idées de Crookes, surtout parce qu'elles étaient émissionnistes, alors qu'eux restaient fidèles à la thèse ondulatoire. Ils ne manquaient pas d'arguments. Goldstein le premier avait fait observer en 1880, (1) que la longueur de l'espace noir cathodique était cent fois plus longue que le chemin moyen des molécules calculé d'après la théorie cinétique, et cette remarque mettait en déroute la technique des mouvements particuliers ; on invoquait en vain le supplément d'énergie provenant de la répulsion exercée par la cathode sur ces charges de même signe ; l'objection subsistait toujours. De son côté, Hertz découvrit en 1883, (2) qu'une feuille d'or battu était perméable aux rayons cathodiques. Cette nouvelle constatation avait une importance capitale dans la question : sur la suggestion de son maître, Lénard s'attacha à élucider la question de la propagation du flux cathodique dans divers milieux, et il entreprit une série de travaux, qui l'ont rendu célèbre (3).

♦ Tout le monde connaît son expérience classique de la fenêtre, pratiquée dans la paroi du tube à vide et fermée par une feuille d'aluminium, d'un quart de millimètre d'épaisseur, capable de supporter la pression de l'atmo-

(1) Goldstein, COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DE BERLIN. 1880.

(2) Hertz, *Ueber den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten* ; ANNALEN DER PHYSIK, t. XLV, 1892.

(3) Les travaux de Lénard sont traduits et analysés en partie dans le premier volume de *Ions, Électrons, Corpuscules* ; particulièrement les articles suivants parus dans les ANNALEN : *Ueber Kathodenstrahlen von atmosphaerischen Druck und in aeuusserstem Vacuum*, tome II, 1894 ; *Ueber die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen*, tome III, 1894.

sphère extérieure. Nés dans l'ampoule de verre, les rayons cathodiques frappent les murs de leur prison transparente, les rendent phosphorescents, mais ne les traversent pas : traverseraient-ils la lamelle d'aluminium ? Lénard dirigea sur elle le bombardement rectiligne, issu de la cathode, et il se mit en observation derrière elle. Impossible d'en douter : les rayons passaient à travers le métal, sortaient du tube et continuaient leur marche au dehors. En faisant une obscurité profonde dans le laboratoire, on apercevait une lueur diffuse émanant de la fenêtre ; elle se répandait dans l'air et restait nettement visible jusqu'à une distance de près de 50 millimètres. On pouvait suivre au delà la trace des rayons par la phosphorescence qu'ils faisaient naître sur un papier imprégné de pentaparylcétone et par leur action photographique. A l'effet de varier le plus possible les conditions de l'expérience, et de faciliter les constatations, en même temps qu'on les précisait, Lénard fit alors souder au tube à vide un second tube normal à la paroi, sur lequel débouchait la lucarne ; on pouvait y introduire des gaz et des vapeurs et en faire baisser la pression d'une valeur quelconque au vide le plus parfait. Or, les rayons extradés du tube de Crookes (on les appellera maintenant les rayons de Lénard), franchissent le vide et le laissent subsister, ce qu'ils ne feraient pas, s'ils étaient constitués par un flot des molécules du gaz. Assez pénétrants pour percer une minuscule lamelle d'aluminium, ils sont arrêtés par une épaisseur d'air de quelques centimètres : les substances rencontrées sur leur chemin leur font obstacle en fonction de leur densité, c'est-à-dire du nombre de particules qu'il leur faut bousculer pour se frayer un passage. C'est conforme aux prévisions cinétiques, et le fait constitue un argument en faveur de la thèse d'un bombardement ; mais, il ne permet plus de supposer un bombardement

effectué par des molécules, attendu que, dans l'air, pris sous 760 millimètres de pression, il existe quelque mille milliards de molécules par centimètre cube (1) ; c'est beaucoup plus qu'il n'en faut pour constituer un rideau impénétrable à des molécules matérielles. Bref : les résultats de ces expériences étaient défavorables à l'hypothèse de Crookes.

Du moment qu'ils démontraient que les rayons n'étaient pas un mouvement des molécules mêmes du gaz, nos savants, qui se croyaient en face d'un dilemme, se voyaient confirmés dans leur opinion ondulatoire, qui plaçait dans l'éther lui-même le siège de l'énergie mise en jeu.

Une dernière observation de Goldstein et de Lénard acheva de les illusionner en paraissant assurer le triomphe de leurs vues : les rayons de Lénard communiquent aux gaz qu'ils traversent une certaine conductivité électrique (ils les ionisent), et ils déchargent un électroscope absolument comme le fait une radiation ultraviolette, qui procède indubitablement par ondes : cette analogie étroite, jointe à l'identité de phosphorescence développée dans les deux cas, fit pencher momentanément la balance du côté de la théorie ondulatoire.

Acculée dans ses derniers retranchements, celle-ci luttait désespérément pour son existence : elle saisit l'argument au vol et l'exploita.

Toutefois c'étaient des ondes bien étranges que ces ondes, sensibles aux attractions électrostatiques, obéissant à l'action d'un pôle d'aimant, dessinant dans les champs des trajectoires paraboliques, circulaires, quelquefois hélicoïdales (nous les étudierons plus loin), éteintes par un parcours de quelques centimètres dans

(1) Dans le vide du tube de Crookes, il n'y a plus que quelques millions de molécules par centimètre cube.

une atmosphère gazeuse, jouant pour elles le rôle d'un milieu trouble, etc. M. J. J. Thomson démontra d'abord, pour ce qui est de la forme des trajectoires décrites par les rayons cathodiques, quand ils se déplacent à travers un champ magnétique, qu'aucune tentative d'explication n'était rationnelle dans la théorie énergétique (1), c'est-à-dire dans l'hypothèse des ondes : une hypothèse qui ne permet même pas de tenter une justification n'a aucune raison d'être conservée.

Une expérience décisive prouva du reste bientôt que l'existence de ces ondes était inadmissible : cette belle expérience est due à un savant français, dont nous avons déjà prononcé le nom, M. Jean Perrin (2). Les travaux des physiciens d'Outre-Rhin n'avaient pu le convaincre et il avait gardé une entière confiance dans les vues émissionnistes de l'école anglaise. Les objections présentées contre leur thèse du bombardement, ne s'adressaient pas au fait en lui-même d'un transport de projectiles, mais à la nature et à la qualité des projectiles transportés. C'était là ce qu'il fallait étudier.

M. Perrin imagina donc de diriger ces projectiles vers un appareil, qui permit de reconnaître ce qu'ils portaient en eux et sur eux, et il construisit un tube de Crookes, dont l'anode était formée de deux cylindres métalliques concentriques ouverts tous deux à l'avant, clos à leur extrémité postérieure ; le cylindre extérieur était maintenu en communication permanente avec le sol, et il possédait par suite les propriétés d'un écran électrique parfait à l'égard du cylindre qu'il enveloppait ; celui-ci était relié à un électroscope,

(1) J. J. Thomson, *Les décharges électriques dans les gaz* ; traduction Barbillion (Paris, Gauthier-Villars, 1900) ; page 144.

(2) M. J. Perrin a communiqué ses premiers résultats à l'Académie des Sciences, en décembre 1895 : son travail a fait l'objet d'une thèse de doctorat ; elle a paru dans les ANNALES DE PHYSIQUE ET CHIMIE, 7^e série, tome XI.

dont la cage était elle-même au sol. La cathode envoyant un pinceau de rayons dans ce système de cylindres, dans lequel le lecteur a reconnu un cylindre de Faraday, l'électroscope accusait aussitôt un apport d'électricité, et cette électricité était invariablement de signe négatif, quelles que fussent les conditions de l'expérience. Déplaçait-on le cylindre anode, ou bien faisait-on dévier les rayons, de sorte qu'ils n'y pénétraient plus, à l'aide d'un aimant ou autrement, aussitôt l'électroscope cessait de rien marquer ; il marquait de nouveau, dès que le pinceau le retrouvait ; l'interposition d'une lamelle d'aluminium ne l'empêchait pas de marquer, et « j'ai pu, disait M. Perrin, faire apporter à l'intérieur d'une enceinte absolument close cent unités électrostatiques : le transport de charges négatives est donc inséparable des rayons cathodiques » (1).

Et il concluait que cette électrisation était « difficilement conciliable avec la théorie des ondulations » ; il eût pu être plus catégorique et déclarer qu'elle était absolument inconciliable avec elle, car ce rayonnement n'avait plus rien de commun avec la propagation d'ondes. Avec une franche simplicité, que l'on ne rencontre que chez les hommes de science de haute valeur, Léonard fut un des premiers à déclarer que l'opinion qu'il avait soutenue ne pouvait plus l'être ; il répéta l'expérience de M. Perrin sur les rayons cathodiques, amenés hors des tubes à vide par le procédé de la lucarne, et il se rallia loyalement aux physiciens, qui attribuent les rayons cathodiques à un mouvement des électrons.

La matérialité de ces électrons est d'un ordre particulier, puisque le vide se maintient parfait dans un espace envahi par eux.

(1) *Ions, électrons, corpuscules* ; tome II, page 560.

Ce sont certainement des éléments plus petits que les molécules de la matière ordinaire ; sinon ils ne pourraient traverser une lamelle d'aluminium, qui est imperméable aux gaz les moins denses et les plus subtils, l'hydrogène et l'hélium, et ils ne pénétreraient pas à une profondeur de 50 millimètres et plus dans l'air de l'atmosphère. Ils se fraient un chemin dans les intervalles intermoléculaires, grâce à leur petitesse relative, dont on a ainsi la preuve indiscutable.

Sir Lodge s'est complu à maintenir leur assimilation avec des projectiles, et il ne manquait aucune occasion de développer cette comparaison, qu'il jugeait plus lumineuse qu'aucune autre : « C'est quelque chose, disait-il » dans une conférence de 1902, déjà citée, comme un » boulet sortant d'un canon, que l'on ne voit pas quand » on est de côté, mais qui peut produire un éclair de » lumière, lorsqu'il rencontre un obstacle, ou peut donner naissance à divers effets..... La région dans laquelle les rayons cathodiques se déplacent, c'est l'espace noir ; les limites de cet espace s'illuminent, lorsqu'elles sont frappées par les projectiles » (1).

La cathode peut donc être comparée à une batterie : elle lance des électrons, droit devant elle ; ses salves électriques sont intermittentes, M. Villard l'a démontré. Faisant emploi d'une ampoule conique, alimentée par des bouteilles de Leyde, et la plaçant dans un champ tournant, ce savant a observé que le faisceau, dévié par ce champ, trace sur la base du cône une circonférence lumineuse, constituée par autant de points brillants qu'il y a d'émissions dans un temps égal à la période du champ tournant. Le nombre de ces points varie de 2000 à 5000 par seconde.

On suit le mouvement de ces projectiles électriques et leur trajectoire devient visible sur une lame de mica,

(1) Loc. cit. : *Sur les électrons*, p. 35.

saupoudrée d'une substance phosphorescente, disposée obliquement à leur direction. Leur trace s'observe d'ailleurs directement, si l'on opère sur un pinceau cathodique mince et délié, délimité par des diaphragmes dans un tube chargé d'oxygène pur ; le rayon prend alors une coloration jaune d'or, assez vive pour être photographiée. M. Villard a fait usage de ce procédé pour suivre des yeux les déviations que produisent les champs électrostatiques et magnétiques. Il a disposé à l'intérieur du tube-ampoule un condensateur plan, développant un champ électrostatique, de direction perpendiculaire au rayon cathodique passant entre les armatures ; attiré d'une part par le plateau +, repoussé par le plateau —, le faisceau dessine une parabole. Dans un champ magnétique uniforme, un rayon lancé normalement aux lignes de force trace un arc de cercle ; un champ d'une centaine de Gauss suffit pour obtenir un enroulement d'un tour entier, sur une circonférence de quelques centimètres de rayon (1).

Mais l'école de Cambridge avait inauguré précédemment une balistique électronique, moins brillante peut-être, non moins féconde en résultats, basée de même sur la mesure de la déviation de ces rayons cathodiques par les forces électrique et magnétique, et dirigée spécialement en vue de déterminer la valeur du rapport $\frac{e}{m}$, e étant la charge et m la masse des particules (2). Les expériences de MM. J. J. Thomson et Wilson sont devenues classiques. Une équation, renfermant, en plus de e et de m , la vitesse w , a été fournie par le phénomène statique, une autre par le phénomène magnétique ; l'étude de la condensation ayant donné la valeur de e , on a pu calculer les deux autres inconnues.

(1) Villard, *Les rayons cathodiques et l'aurore boréale* : JOURNAL DE PHYSIQUE, juin 1908, 4^e série, t. VII, p. 429.

(2) J. J. Thomson, PHILOSOPHICAL MAGAZINE ; t. XLIV, p^o 293 ; 1897.

La masse de l'électron est invariablement la 2000^e partie de celle de l'atome d'hydrogène, le plus léger des atomes connus, et sa vitesse oscille entre 30 000 et 60 000 kilomètres par seconde. L'électron reste identique à lui-même en toute circonstance : il voyage sans support atomique, et possède son individualité propre, bien différent de l'ion +, de masse plus grande, animé d'une moindre vitesse, de qualité variable avec la nature des gaz mis en expérience. Ce pourrait bien être l'atome privé de quelques électrons ? On y a vu un noyau central, dont la structure détermine la nature du corps simple considéré, autour duquel les électrons tourneraient comme les planètes tournent autour du Soleil, en nombre variable, d'après la valeur du corps simple.

Mais nous quittons la terre ferme de l'expérience indiscutable, des constatations formelles et des mesures précises et nous sortons des limites que nous nous étions tracées dans ce travail.

Son objet principal était de retracer l'histoire et de faire l'examen critique des hypothèses et des théories, qui ont eu cours successivement dans l'enseignement et dans la science, et de montrer comment elles ont conduit aux doctrines admises actuellement.

L'hypothèse de la matérialité de l'électricité et des fluides continus, qui a prévalu d'abord et a été longtemps acceptée, avait été progressivement écartée : on devrait dire qu'elle l'a été provisoirement, car on en avait gardé le souvenir et conservé le vocabulaire ; celui-ci se prêtait mieux que tout autre à l'expression des faits.

On a été ramené à cette manière de voir par la force des choses, par l'impérieuse domination d'une idée, qui s'imposait, en vertu même de la part de vérité qu'elle renfermait.

L'hypothèse a revêtu une forme nouvelle, concordant mieux avec les découvertes de la science : des vérifications expérimentales extrêmement ingénieuses ont démontré qu'elle correspondait dès lors à une réalité. « Entre une hypothèse et un fait », avait dit Eugène Vicaire, et nous avons noté ce jugement au début de notre étude, « il n'y a qu'une différence de certitude » et non pas de nature ». L'hypothèse de la matérialité sous une forme particulière, granulaire et discontinue, est devenue un fait, par la constatation de sa réalité.

Elle a donné naissance à la théorie électronique, basée sur la connaissance du fait. Cette théorie est une œuvre ingénieuse de l'esprit, comme les précédentes. Elle se modifiera, on n'en peut douter, car elle devra s'adapter à des découvertes nouvelles ; et elle se trouvera elle-même un jour trop courte, par un côté ou l'autre ; à son tour, elle connaîtra la sénilité et ses impuissances.

Elle passera : mais l'électron restera.

C'est ce que je voulais démontrer.



REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

PUBLIÉE PAR

LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE DE BRUXELLES

TROISIÈME SÉRIE

Cette revue de haute vulgarisation, fondée en 1877 par la Société scientifique de Bruxelles, se compose actuellement de deux séries : la **première série** comprend 30 volumes (1877-1891) ; la **deuxième série** 20 volumes (1892-1901). La livraison de janvier 1902 a inauguré la **troisième série**.

La revue paraît en livraisons trimestrielles, à la fin de janvier, d'avril, de juillet et d'octobre. Chaque livraison renferme des parties principales.

La **première partie** se compose d'**Articles originaux**, où sont traités les sujets les plus variés se rapportant à l'ensemble des sciences mathématiques, physiques, naturelles, sociales, etc.

La **deuxième partie** constitue la **Bibliographie scientifique** où l'on trouve un compte rendu et l'analyse critique des principaux ouvrages récemment parus.

La **troisième partie** est une **Revue des Revues et Publications périodiques** où les revues étrangères et nationales sont résumées et appréciées. On y trouve aussi des archives scientifiques et littéraires de notre temps.

Chaque livraison contient ordinairement aussi un ou plusieurs articles de **Variétés**.

CONDITIONS D'ABONNEMENT

Le prix d'abonnement à la REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES est de **37 francs** par an pour la Belgique, **39 francs** pour la France, **44 francs** pour les autres pays. Les membres de la Société scientifique de Bruxelles jouissent d'une réduction de **5 francs**.

Table analytique des cinquante premiers volumes de la REVUE. Un vol. du format de la REVUE de XII-168 pages. Prix : **5 francs** ; pour les abonnés, **2 francs**.

Des volumes isolés seront fournis aux nouveaux abonnés à des conditions très avantageuses.

S'adresser pour tout ce qui concerne la Rédaction et l'Administration au Secrétariat de la Société scientifique, 11, rue des Bains, Louvain.

Une Notice sur la Société scientifique, son but, ses vœux, est envoyée gratuitement à ceux qui en font demande au Secrétariat.

Louvain. — Imp. F. Ceuterick, rue Vital Decoster, 60.