

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

L'ÉVOLUTION DES IDÉES SUR LA LUMIÈRE

ET

L'ŒUVRE D'ALBERT MICHELSON

ASSOCIÉ ÉTRANGER DE L'ACADÉMIE

PAR

M. ÉMILE PICARD

SECRÉTAIRE PERPÉTUEL

LECTURE FAITE EN LA SÉANCE PUBLIQUE ANNUELLE DU 16 DÉCEMBRE 1935

MESSIEURS,

L'histoire des théories et des expériences auxquelles a donné lieu le développement de l'Optique prise dans son acception la plus étendue présente un très vif intérêt. Les spéculations les plus subtiles sur la nature de la lumière et des expériences d'une haute précision s'y affrontent. L'objet des théories dans la science, leur force et leur faiblesse y apparaissent avec un singulier relief. Nous n'avons plus guère aujourd'hui la prétention de saisir la réalité dans une théorie physique; on voit surtout dans celle-ci un moule analytique ou géométrique utile et fécond pour une représentation provisoire des phénomènes, ne



croyant plus que l'accord d'une théorie avec l'expérience démontre qu'elle exprime la réalité des choses. De tels propos ont pu parfois paraître décourageants; on doit plutôt, semble-t-il, s'émerveiller que, avec des représentations plus ou moins lointaines et décolorées des choses, l'esprit humain ait pu débrouiller le chaos de tant de phénomènes, en dégagant de la connaissance scientifique des idées de beauté et d'harmonie, et ce n'est pas un paradoxe de dire que la science met de l'ordre, un ordre provisoire tout au moins, dans la nature.

Je me propose de retracer aujourd'hui succinctement l'évolution des théories relatives à la lumière, et aussi de rendre hommage à l'expérimentateur de génie que fut notre Associé étranger Albert Michelson.

*
* *

Dans l'antiquité grecque régnaient pour la lumière des doctrines d'émission. Pour Démocrite, suivi par Lucrèce dans un poème célèbre, la vision est causée par la projection de particules lumineuses qui se détachent des objets et viennent frapper l'organe de la vue. Les Pythagoriciens au contraire supposaient que l'œil projette hors de lui des rayons qui vont saisir les objets perçus; les Platoniciens trouvaient moyen de concilier ces doctrines opposées, pendant que l'École Péripatéticienne regardait la lumière comme une *qualité* des corps lumineux.

A la Renaissance, Galilée se demande, semble-t-il, le premier si la lumière met un temps fini pour arriver d'un point à un autre, et il cherche à réaliser une expérience pour en décider. Deux observateurs étant placés à une certaine distance, le premier envoie un rayon de lumière au second qui le lui renvoie aussitôt. Les techniques du temps ne permettaient pas de tirer parti d'une idée qui devait plus tard être féconde. Quant à Descartes, il commence par déclarer dans sa *Dioptrique* qu'il n'est pas besoin de dire quelle est la nature de la lumière,

et qu'il suffit d'une comparaison qui aide à la concevoir. L'une d'elles est celle du bâton par lequel un aveugle sent les objets qui se rencontrent autour de lui ; le bâton étant incompressible, il y a là une pression transmise instantanément. Descartes, très soucieux à ses heures de l'observation et de l'expérimentation, regardait comme établie la propagation instantanée de la lumière par le fait que les éclipses de lune se produisent exactement au moment où le Soleil et la Lune sont en opposition par rapport à la Terre, argument sans valeur à cause de l'énorme vitesse de propagation de la lumière. En ce qui regarde les couleurs, Descartes pense que, de même qu'avec un bâton on peut se rendre compte dans une certaine mesure de la nature des objets touchés, pareillement les couleurs ne sont dans les corps colorés que les diverses façons dont ces corps transmettent le mouvement à nos yeux. Voulant dans les *Météores* approfondir davantage la notion de couleur, le philosophe parle des petites boules de la matière subtile qui roulent de diverses façons dans les pores des corps terrestres, explication qui faisait sourire quelque peu Pascal. Rappelons encore le curieux passage où Descartes parle des corps noirs dans sa *Dioptrique* : « Il y a, dit-il, des corps, qui, étant rencontrés par les rayons de la lumière, les amortissent et leur ôtent toute leur force, à savoir ceux qu'on nomme *noirs*, lesquels n'ont pas d'autre couleur que les ténèbres. »

Le nom de Fermat est resté classique en Optique. Le grand géomètre pose le premier un principe général d'après lequel la nature agit par les voies les plus courtes et les plus aisées, et il en déduit la loi des sinus dans la réfraction en recourant à sa méthode *de maximis et minimis*. Fermat avait proposé, sans plus de succès, la même méthode que Galilée pour déterminer la vitesse de la lumière. C'est dans le Ciel que furent d'abord réalisées des observations permettant d'obtenir cette vitesse ; l'astronome danois Rømer, discutant les observations de Cassini sur les satellites de Jupiter, démontra que la lumière met environ huit minutes un quart à parcourir le rayon de l'orbite terrestre. De nombreuses années devaient s'écouler avant que

des expériences effectuées à la surface de la Terre fassent connaître la vitesse de la lumière; elles nous rappelleront particulièrement tout à l'heure les noms de Fizeau, de Foucault et d'Albert Michelson.

La seconde moitié du xvii^e siècle vit se développer deux doctrines très différentes sur la nature de la lumière. Huyghens, dans son admirable *Traité de la Lumière*, propose la théorie des ondulations. D'après celle-ci, la lumière se propage par ondes dans un milieu éthéré, formé de petites boules élastiques, milieu distinct de l'air qui transmet le son. Huyghens évoquait même l'expérience de Torricelli pour prouver que le vide barométrique, laissant passer la lumière, *doit contenir* une matière d'espèce nouvelle. De cette transmission à travers un *éther* élastique, Huyghens déduit les lois de la réfraction de la lumière, retrouvant pour le rapport des sinus la valeur que Fermat avait obtenue avec son principe du minimum, et il donne une théorie de la double réfraction dans les cristaux uniaxes.

L'œuvre de Huyghens, d'une si grande originalité, fut cependant longtemps oubliée. Sous l'égide du grand nom de Newton, qui après quelques hésitations avait repris l'idée des atomistes de l'antiquité, la théorie de l'émission de la lumière triomphe au xviii^e siècle. Cette théorie newtonienne de l'émission est d'ailleurs beaucoup plus complexe qu'on ne le dit souvent. D'une part de petits corpuscules émanés des corps lumineux produisent la vision en frappant notre rétine, mais Newton admet d'autre part l'existence d'un milieu animé de vibrations très rapides dans lequel se meuvent ces corpuscules. D'ailleurs les molécules lumineuses, qui se trouvent sur un même rayon, ne se trouvent pas dans les mêmes circonstances physiques, Newton les regarde comme différemment orientées, par suite d'un mouvement de rotation sur elles-mêmes. La réflexion et la réfraction étaient ainsi expliquées, en attribuant une structure périodique à tout rayon de lumière simple avec des accès de plus facile *réflexion* et de plus facile *transmission*; on voyait apparaître en Optique l'idée de périodicité que l'on retrouve dans les différentes théories de la lumière. Pour rendre compte des diverses couleurs du spectre, dont l'étude

expérimentale est un de ses plus beaux titres de gloire, Newton imaginait une longueur d'accès fixe pour une couleur donnée, et variant d'une couleur à l'autre. On le voit, la théorie newtonienne de la lumière, envisagée dans son intégrité, comprenait à la fois émission et ondulation. Tout cela nous paraît sans doute fort vague, mais tout est-il si clair dans les théories les plus modernes sur cette énigme qu'est la lumière? Quant à l'élément précis caractérisant la couleur d'une lumière monochromatique, à savoir la période de la vibration, il fut signalé, semble-t-il, pour la première fois en 1699 par Malebranche, le philosophe de la *Vision en Dieu*, dans un Mémoire intitulé : *Réflexions sur les lumières et les couleurs, et la génération du feu*, et imprimé dans les Recueils de notre Académie. Le célèbre Oratorien, qui avait d'abord suivi Descartes, s'était, après la découverte de Rømer sur la vitesse finie de la lumière, rallié aux idées de Huyghens.

Au XVIII^e siècle la théorie des ondulations de Huyghens est presque complètement abandonnée; seul Euler en reste partisan. Longtemps oubliées, les idées du grand hollandais furent reprises au XIX^e siècle par Young et par Fresnel. Pour Fresnel, l'éther est un solide élastique, et la lumière est due à ses vibrations. On ne possédait alors aucune théorie générale de l'élasticité. Les analogies avec le mouvement des ondes sonores étaient trompeuses, et c'est pour Fresnel un grand titre de gloire d'avoir affirmé la nécessité des vibrations *transversales* de l'éther lumineux; elles étaient indispensables pour l'explication des phénomènes où intervient la polarisation. Les intuitions géniales de Fresnel lui permirent ainsi de créer une doctrine des ondes lumineuses, qui fut ensuite perfectionnée et complétée par les travaux analytiques d'une longue suite de physiciens géomètres.

Rappelons, en passant, une théorie de la lumière qui s'est recommandée du nom d'un grand poète. Goethe, s'inscrivant contre les expériences de Newton sur la décomposition du spectre solaire, a passé de longues années à étudier les phénomènes lumineux, et son *Traité des Couleurs* forme deux gros volumes. Pour lui, la couleur blanche est simple comme la lumière noire, et les diverses colorations

résultent du mélange en proportions convenables du blanc et du noir. Son point de départ était l'expérience suivante. Regardant à travers un prisme un mur blanc vivement éclairé, Gœthe fut étonné de voir que l'image observée était blanche, sauf sur les bords où elle était irisée. En fait cette observation n'a rien de contraire aux idées newtoniennes; chaque point du mur blanc donne un spectre coloré, mais ces images partielles, sauf sur les bords, se recouvrent dans leurs parties communes, en donnant de la lumière blanche; les bords seuls sont teints. Gœthe fut très irrité de l'accueil fait à sa théorie de la lumière et il se montra assez violent contre les mathématiciens qui, disait-il, ne commettent que des contre-sens.

Il est curieux de noter que, vers la même époque, se plaçant d'ailleurs à un autre point de vue, M^{me} de Staël, Chateaubriand, Lamennais, le jeune Lamartine protestaient en France contre ce qu'ils appelaient l'engeance mathématicienne. Lamartine écrivait en 1833 dans une brochure sur les destinées de la poésie : « Les hommes géométriques, qui seuls avaient la parole, étaient parvenus à flétrir et à tuer en eux toute la partie morale, divine, mélodieuse de la pensée humaine. . . . Tout était organisé contre la résurrection du sentiment moral et poétique. Le chiffre seul était permis, honoré, payé. Depuis ce temps, j'abhorre le chiffre, cette négation de toute pensée. . . . Les mathématiques étaient les chaînes de la pensée humaine. Je respire, elles sont brisées. » Les mathématiciens passaient alors, on le voit, un mauvais quart d'heure avec les poètes, qui ont cependant avec eux une grande affinité.

Rappelons que Gœthe fut plus heureux en biologie qu'en physique. On lui doit d'intéressantes observations en anatomie comparée et en tératologie. Il signale notamment l'analogie du crâne et des vertèbres. En botanique, il écrit un livre sur la *Métamorphose des plantes*; pour lui calice, corolle, étamines, pistil sont des transformations de la feuille. On se rappelle l'intérêt pris par Gœthe en 1830 à la lutte célèbre entre Cuvier et Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, débat beaucoup plus intéressant pour lui que la Révolution de Juillet.

*
* *

Fresnel avait mis sur ses bases définitives, au moins pour un temps, la doctrine des ondes lumineuses. Vers le milieu du siècle dernier il est peu de physiciens qui doutaient de l'existence de l'éther où devaient se produire ces ondulations, et, pour plusieurs des plus illustres d'entre eux, un des objets principaux de la Physique était d'étudier ce milieu éthéré. Fresnel eut de nombreux continuateurs parmi lesquels brille au premier rang Hippolyte Fizeau. Aux travaux de ce grand physicien, qui jeta dans la science tant d'idées nouvelles, se rattache une partie de l'œuvre de notre Associé étranger Albert Michelson.

Celui-ci naquit le 19 décembre 1852 à Strelno dans la partie de la Pologne appartenant alors à l'Allemagne; ses parents partirent pour les États-Unis quand il avait deux ans. Établis d'abord dans le Far-West et à Virginie, dans le Nevada, ils s'installèrent définitivement quelques années après à San-Francisco. C'est là que Michelson fit ses études supérieures, et sa vive intelligence appela bientôt l'attention de ses maîtres. On décida qu'il entrerait à l'École ou Académie Navale des États-Unis; mais une grave difficulté se présenta, aucune place n'étant actuellement vacante. Le jeune homme ne voulut pas cependant modifier ses projets sans tenter une dernière chance. Il vint à Washington et se fit présenter au Président Grant, sur lequel il fit une excellente impression; en même temps il intéressa à lui notre ancien Associé étranger l'illustre astronome Newcomb, qui dirigeait à cette époque le *Naval Observatory*, dépendant de la marine des États-Unis. Grâce à ces protections qui lui font grand honneur, le jeune Michelson entra en surnombre à l'Académie Navale. A sa sortie, il fut pendant deux ans aspirant dans l'armée de mer. Le voyage d'études terminé, il resta de 1875 à 1879, Instructeur dans cette Académie pour la Physique et la Chimie.

Après avoir été employé pendant un an à l'Office du *Nautical Almanach* de Washington, Michelson vint en Europe; il suivit en particulier les cours des Universités de Berlin et de Heidelberg et aussi ceux du Collège de France à Paris. De ce séjour en France il avait conservé le meilleur souvenir; c'est là qu'il eut l'occasion d'étudier les travaux de Fizeau et d'entrer en relations avec les physiciens français de cette époque.

Pendant qu'il était Instructeur à l'École Navale, Michelson avait eu à préparer un appareil illustrant une méthode de mesure pour la vitesse de la lumière. C'est ce qui peut être décida de l'orientation de ses recherches; il n'est pas une question de Physique qui ait passionné davantage notre Confrère. Peu après, il reprend la méthode de Foucault avec le miroir tournant, en lui faisant subir d'importantes modifications, où apparaît déjà son extraordinaire ingéniosité dans la réalisation des dispositifs expérimentaux. Dans l'expérience de Foucault la plus grande distance parcourue par la lumière entre le miroir fixe et le miroir tournant en tenant compte des réflexions successives était d'environ *vingt* mètres. Foucault admet d'ailleurs, comme tous ceux qui l'ont suivi dans cette voie, que les lois habituelles de la réflexion restent valables dans le cas où le miroir réfléchissant a une vitesse considérable. Il semble que les physiciens aient admis *a posteriori* cette extension des lois de la réflexion par suite de la concordance des résultats obtenus dans des conditions très différentes. Quoi qu'il en soit, d'habiles combinaisons optiques permettent à Michelson de porter la distance parcourue par la lumière de *vingt* à *sept cents* mètres, et d'augmenter ainsi le déplacement de l'image à observer dans le micromètre, en supprimant d'ailleurs le petit miroir oblique employé par Foucault et en examinant directement l'image. Ce déplacement, qui était seulement de 0^{mm},7 dans l'expérience de Foucault, atteignait 133^{mm} dans celle de Michelson, les vitesses de rotation employées étant de deux cent cinquante à trois cents tours par seconde. Dans les années qui suivirent, Michelson reprend plusieurs fois son expérience, et le nombre trouvé alors fut de

299895 kilomètres par seconde avec une erreur d'au plus de un deux cent millièmes.

Avec le miroir tournant Foucault avait eu surtout pour but de trouver les vitesses relatives de la lumière dans l'air et l'eau. On se proposait alors de décider entre la théorie de l'émission et celle des ondu-
lations. Au point de vue qualitatif, l'expérience de Foucault, réalisée en interposant sur le parcours des rayons lumineux un tube plein d'eau fermé par des verres parallèles, montra que la vitesse de la lumière est moindre dans l'eau que dans l'air. En 1884, Michelson obtint non seulement le résultat qualitatif précédent, mais il montra aussi que le rapport des vitesses est égal à l'indice de réfraction, conformément à la théorie des ondes. Bientôt après, remplaçant dans l'expérience l'eau par le sulfure de carbone, il trouva pour le rapport des vitesses 1,75 au lieu de l'indice de réfraction 1,64 attendu du sulfure de carbone. Le résultat pouvait paraître troublant, mais Michelson, confiant dans la précision de son expérience, n'hésita pas à la faire connaître malgré cette apparente contradiction. La discordance fut ultérieurement expliquée, et le résultat de Michelson se montra d'accord avec une théorie plus complète. On sait en effet que, relativement à la propagation des ondes, on distingue entre la vitesse de propagation d'une onde séparée et celle d'un train d'ondes, vitesses qui sont différentes dans une substance très dispersive comme le sulfure de carbone. La vitesse à considérer pour obtenir l'indice de réfraction est la première de ces vitesses; il s'agit au contraire, dans l'expérience du miroir tournant, de la seconde, qui est plus petite, comme l'a montré Lord Rayleigh en approfondissant cette question délicate. La théorie est donc en complet accord avec l'expérience de Michelson sur le sulfure de carbone. Elle montrait avec quel soin opérait dès cette époque le jeune physicien, et déjà se révélait l'expérimentateur hors de pair qu'il fut toute sa vie. Il montra aussi dans le même travail, en employant un tube de sulfure de carbone de dix pieds de long, que la vitesse de la lumière rouge dans ce liquide dépasse de 2 pour 100 la vitesse de la lumière bleue, résultat de grande importance pour les théories de la dispersion.

*
* *

Le mot d'interférence revient souvent en Optique. On peut dire que Michelson ne cessa jamais d'étudier des interférences. Rappelons ce qu'on entend par là. Si dans l'éther deux ondes ayant même origine viennent, après avoir parcouru des chemins inégaux, à avoir sensiblement la même direction, il y aura composition des deux mouvements. On en conclut que, si la différence des chemins parcourus est d'un nombre impair de demi-longueurs d'ondes, il y aura aux points où les ondes sont ainsi en discordance un repos presque absolu de l'éther et par suite obscurité : c'est le principe des interférences. Le physicien anglais Young l'a vérifié dans une expérience remarquable où apparaissaient des franges d'interférence, expérience qui prête cependant à quelques critiques. Vingt ans après, Fresnel réalisait son expérience décisive des deux miroirs, donnant une consécration définitive au principe des interférences ; elle ne permettait d'ailleurs d'observer des interférences que pour des différences de marche d'un petit nombre d'ondulations. Lorsqu'on se sert de lumière *blanche* pour produire ce phénomène, on n'observe que quelques franges de part et d'autre de la frange centrale qui correspond à une différence nulle, la complexité de la lumière amenant rapidement la superposition des phénomènes élémentaires produits. Fizeau et Foucault, dans un travail en commun, reculèrent notablement les limites pour lesquelles on pouvait avoir des franges observables et mesurables, en analysant au spectroscope la lumière qui traverse l'appareil interférentiel et employant ainsi une lumière relativement simple ; on peut incidemment remarquer à ce sujet que le dispositif employé par les physiciens français en 1846 pour obtenir un spectre relativement pur était l'appareil spectroscopique même avec lequel Kirchoff devait faire trois ans plus tard ses belles découvertes sur l'analyse spectrale.

Fresnel, dès 1818, avait appelé l'attention des physiciens sur l'en-

traînement des ondes lumineuses dans les corps réfringents en mouvement, et il avait, comme conclusion d'un raisonnement assez discutable, énoncé que ces corps communiquaient aux ondes une fraction de leur vitesse représentée par l'expression simple $1 - \frac{1}{n^2}$, n étant l'indice de réfraction. Fizeau avait fait à ce sujet, en 1851, une expérience remarquable confirmant les idées de Fresnel. Le mode d'observation qu'il employait consistait à produire des franges d'interférence avec deux rayons de lumière, après leur passage à travers des tubes parallèles, dans lesquels un fluide peut s'écouler avec une grande vitesse et dans deux directions opposées. Michelson, en 1887, fait une critique approfondie des conditions de cette expérience de Fizeau, et il répète celle-ci avec un appareil où apparaît déjà la première idée de l'interféromètre qu'il utilisera plus tard dans de nombreuses recherches. Dans des tubes de *six* mètres de long et une vitesse pour l'eau de *sept* mètres par seconde, le déplacement des franges était de neuf dixièmes de frange, et l'expérience de Fizeau était confirmée. Depuis lors le problème a été repris au point de vue théorique par Lorentz; celui-ci a montré que, dans le rapport envisagé par Fresnel, devait être introduit un terme dépendant de la dispersion du milieu en repos.

Nous avons fait pressentir plus haut le rôle important des interféromètres, c'est-à-dire des appareils susceptibles de donner des franges d'interférence. Les interféromètres employés par Michelson dans ses travaux sont susceptibles de formes variées, mais on y trouve toujours un faisceau de lumière incident, que des réfractions et des réflexions diverses séparent en deux faisceaux. Ces faisceaux qui proviennent d'une même source et ont suivi des chemins différents, viennent finalement interférer, donnant suivant les dispositifs des franges rectilignes ou circulaires à la sortie de l'appareil.

L'interféromètre de Michelson a été employé par lui à des fins très diverses. On peut par exemple l'utiliser pour déterminer l'indice d'une substance, en interposant une lame de celle-ci sur le trajet d'un des rayons. Il a servi en particulier pour la recherche de la nature exacte

d'une radiation. Michelson a ainsi étudié les radiations considérées alors comme simples, faisant la découverte capitale qu'elles sont en réalité complexes à peu d'exceptions près. Avec une radiation simple, on observe des disparitions et réapparitions des anneaux d'interférence. Avec une radiation composée, il n'y a plus de disparition complète de lumière, mais la visibilité des anneaux passe par une série de maxima et de minima, d'où Michelson a su déduire, au moyen de ses courbes de visibilité, le nombre et l'intensité des composantes. Dans ces travaux, où il a découvert la fine structure des raies spectrales, notre Confrère a déployé une ingéniosité extrême. Il a signalé comme particulièrement monochromatiques quatre radiations émises par la vapeur de cadmium traversée à basse pression par un courant électrique. Une d'elles, de couleur rouge, dont la longueur est de 6438 angströms (l'angström étant le dix-millionième d'un millimètre) est d'une grande finesse et absolument dénuée de raies satellites. Aussi a-t-elle été choisie *comme étalon fondamental pour les mesures spectroscopiques de longueur d'onde*; elle permet d'obtenir des interférences correspondant à une différence de marche de *vingt centimètres*. Le double caractère de la raie rouge de l'hydrogène fut aussi une découverte qui a eu une profonde influence sur le développement des théories modernes de l'atome.

On ne saurait trop louer des recherches d'une si haute précision. Le rôle du nombre dans les sciences est capital. Nous ne connaissons des objets extérieurs que leurs rapports, et les nombres nous fournissent un ensemble de signes appropriés à exprimer ces rapports, après que nous avons substitué aux choses des nombres qui leur correspondent en vertu de certaines définitions. Une décimale nouvelle n'est plus aujourd'hui un luxe. Comme l'a dit très justement notre éminent correspondant M. Éd. Guillaume : « Les révolutions scientifiques ont pour point de départ des mesures faites avec la précision que leur époque permettait d'atteindre, et rien n'est plus définitivement fécond en science que le gain d'une décimale. »

Michelson a aussi augmenté les moyens d'investigation de l'analyse

spectrale en construisant un spectrographe nouveau, dit à échelons, formé de lames superposées ayant la même épaisseur, mais des largeurs décroissantes. Ce spectroscopie, a écrit Mascart, fut une véritable surprise pour les physiciens. L'appareil est très lumineux et a un grand pouvoir séparateur avec, il est vrai, un champ étroit. Il a été très utile dans certaines recherches sur le phénomène de Zeeman.

Rappelons encore les admirables réseaux construits par Michelson, allant plus loin que ceux de Rowland. Les plus grands réseaux de celui-ci avaient quinze centimètres. Michelson en a construit de trente à trente-cinq centimètres; le pouvoir séparateur se trouve alors doublé.

*
* *

Il existe à Sèvres, au pavillon de Breteuil, un Bureau international des Poids et Mesures, où sont conservés les étalons internationaux de longueur et de masse. Dans un caveau, dont les portes munies de trois serrures ne s'ouvrent qu'en de rares occasions, reposent les prototypes internationaux servant aux définitions du mètre et du kilogramme-masse, chacun avec trois témoins. Des causes nombreuses, dont plusieurs bien difficiles à déterminer, peuvent contribuer à modifier étalons et prototypes. Aussi que d'inquiétudes, quand, au bout d'un certain temps, on constate des désaccords restant inexplicables. Il y a quelques années, certains étalons d'usage du Bureau ont subi par rapport au prototype international un allongement d'environ quatre dix-millièmes de millimètre, nombre énorme en l'espèce. Ce fut un grand scandale; on finit par en trouver diverses raisons. Mais, dira-t-on, pourquoi n'est-ce pas le prototype international qui a diminué? C'est d'abord parce qu'il reste d'accord avec les témoins qui partagent sa captivité. C'est aussi qu'il a varié de quantités au-dessous des erreurs d'observation par rapport à la majorité des étalons; car là aussi le système majoritaire fonctionne en quelque manière. Un prototype international, comme un roi constitutionnel, doit être d'accord avec la majorité de ses sujets.

Ne pourrait-on pas avoir une définition du mètre plus sûre que celle donnée par l'emploi d'un prototype plus ou moins sujet à changement. Une définition de l'unité de longueur au moyen d'un nombre de longueurs d'onde d'une radiation monochromatique bien déterminée peut paraître préférable. On a considéré qu'une telle longueur d'onde doit présenter plus de fixité que la longueur d'un morceau de métal. La lumière, regardée comme une messagère céleste, apparaît comme un élément plus noble, moins sujet au changement qu'un prototype formé d'une matière plus grossière, fut-elle en platine iridié. On sait aujourd'hui que diverses actions peuvent produire dans un spectre des déplacements de raies, par suite changer les longueurs d'onde, mais ces actions sont très spéciales et ne se présentent pas dans les conditions normales de mesure. Michelson, qui avait découvert des radiations vraiment monochromatiques, entreprit donc la mesure du mètre étalon en longueur d'onde. Fizeau, dans ses recherches sur la dilatation des cristaux, avait jadis donné pour la mesure des longueurs une méthode reposant sur le principe des interférences, mais il s'agissait là de longueurs très petites. Il ne semblait pas que l'on pût, pour la mesure du mètre, tirer parti de l'idée du grand physicien. Michelson cependant, venu à Sèvres avec son collaborateur Morley, réussit vers 1892 à effectuer la détermination du prototype international du mètre en longueurs d'onde de la raie rouge du cadmium. Cette mesure se fait en comptant le nombre des franges d'interférence qui passent pendant le déplacement d'un des miroirs de l'interféromètre.

Il semblait impossible de compter sans se tromper un nombre considérable d'ondes successives. Notre Confrère a tourné la difficulté en employant une série d'étalons intermédiaires. Mais on ne peut aller plus loin qu'un étalon de dix centimètres, par suite de l'impossibilité d'obtenir, comme nous l'avons dit, des interférences pour des différences de marche dépassant vingt centimètres. Arrivé à ce point, on doit donc comparer cet étalon au mètre par les procédés ordinaires de la métrologie. Le travail de Michelson est un véritable monument

scientifique et marque une date dans l'histoire des progrès de l'Optique. Il lui coûta plusieurs années d'études, et il reprit même ensuite les mesures avec M. Benoit, Directeur du Bureau international des Poids et Mesures. Finalement, le nombre des longueurs d'onde de la raie du cadmium contenu dans le mètre étalon fut trouvé égal à 1.555.165,5; la longueur d'onde des raies envisagées était de 6438,472 angströms. Ces nombres se rapportent d'ailleurs à des valeurs déterminées de la température ambiante et de la pression atmosphérique, car à des variations de ces données correspondent des variations du chemin optique dans l'interféromètre. La mesure du mètre en longueurs d'ondes fut reprise en 1913 par MM. Benoit, Perot et Fabry, à l'aide de l'interféromètre à ondes multiples de Perot et Fabry, où les lames sont semi-argentées; ils ont trouvé des nombres extrêmement voisins des précédents. On peut dire que, grâce à Michelson et à ceux qui l'ont suivi, on a, sous la réserve faite de la constance des longueurs d'onde, une unité de longueur définie à un dix-millionième près.

*
* *

Quand on admet l'existence de l'éther, on doit nécessairement rechercher les rapports entre l'éther et la matière. Fresnel, nous l'avons vu, s'en était déjà préoccupé, mais bien auparavant l'observation avait appelé l'attention sur de curieux phénomènes. En 1728, Bradley avait découvert que la direction apparente des étoiles était modifiée par le mouvement de translation de la Terre. La chose était très simple pour les partisans de la théorie de l'émission. Il suffit de penser à un observateur entraîné sur un bateau; si un projectile arrive perpendiculairement à la vitesse du bateau, l'observateur verra le projectile arriver dans une direction faisant avec la direction vraie un angle dont la tangente sera égale au rapport, appelé aberration, entre la vitesse du bateau et la vitesse du projectile. De fait, en supposant le rayon lumineux venant de l'étoile perpendiculaire à la vitesse de la

Terre sur son orbite, l'angle d'aberration a une valeur d'environ vingt secondes. L'existence de cette aberration semble indiquer que le milieu dans lequel se propagent les ondes lumineuses est *fixe* par rapport à la lunette qui sert à observer, car, si l'éther contenu à l'intérieur de la lunette était transporté avec elle, la direction apparente de l'étoile se confondrait avec sa direction réelle. Or, l'aberration étant déterminée par le rapport des vitesses de translation de la Terre et de la lumière, un changement dans l'une de celles-ci devrait la faire varier. L'astronome anglais Airy, reprenant une idée déjà émise au xviii^e siècle par Boscovitch, fit l'observation en remplissant d'eau la lunette, ce qui diminuait la vitesse de la lumière. Avec une lunette ainsi remplie, on devait donc voir une étoile dans une autre direction qu'avec une lunette employée dans les conditions ordinaires. Or Airy constata qu'il n'en était rien. On expliqua le fait en disant que l'eau entraîne l'éther qu'elle contient, non pas avec sa vitesse propre, car alors il n'y aurait pas d'aberration, mais avec une vitesse suffisante pour compenser la diminution de la vitesse de la lumière. Et ceci sembla trouver une confirmation dans l'expérience de Fizeau, reprise par Michelson dont nous avons parlé plus haut.

Des recherches, tant théoriques qu'expérimentales, furent faites aussi relativement aux effets du mouvement d'un milieu sur la vitesse de la lumière quand on utilise des lumières entraînées avec la Terre, au lieu de faire appel à des lumières dont la source n'est pas sur notre planète. Il en résulta qu'il est impossible de déceler un mouvement relatif de translation uniforme, au moins quand on se borne aux termes du premier ordre par rapport à l'aberration. Quant aux termes du second ordre, on a considéré longtemps qu'il était impossible de mettre en évidence, avec une expérience d'Optique, des grandeurs répondant à des effets de cet ordre, à supposer qu'ils existent. Ce fut Michelson qui réalisa le premier une expérience dans laquelle un effet du second ordre aurait pu être mesuré, et cette expérience a rendu célèbre le nom de notre Confrère. Il utilise encore ici son interféromètre; l'appareil est disposé de telle sorte que deux

rayons lumineux à angle droit après des réflexions sur divers miroirs soient renvoyés dans la même direction et donnent des franges d'interférence. Pour une position déterminée de l'appareil, Michelson calcule les chemins parcourus par les rayons lumineux en réalité c'est-à-dire dans l'éther *qu'il suppose immobile*. On trouve ainsi une différence de marche. En faisant tourner tout l'appareil de 90° , le signe de cette différence se trouve changé, ce qui introduit une différence de marche double. Le calcul donne le nombre de franges dont tout le système doit se déplacer; cet effet, tel que le donne ce calcul, est du second ordre et n'est pas négligeable. Or l'expérience montre qu'il n'en est rien; on ne trouve pas de déplacement appréciable. Dans une des expériences de Michelson et de son collaborateur Morley, l'interféromètre était monté sur un bloc de pierre posé sur un anneau en bois, et le tout flottait sur du mercure. On aurait dû, d'après la théorie de l'éther immobile, trouver un déplacement de quatre dixièmes de frange; l'observation a donné moins d'un vingtième de frange.

Il semble donc résulter d'expériences optiques faites à la surface de la Terre qu'il est impossible de mesurer un mouvement de celle-ci par rapport à l'éther; on ne peut, comme on l'a dit, sentir le vent d'éther. Quelques-uns avaient pensé qu'on aurait peut-être un résultat positif en opérant sur une montagne, mais là encore aucun mouvement relatif de la Terre par rapport à l'éther ne put être mis en évidence.

Doit-on conclure de là que l'éther est entraîné par la Terre? C'est une question, dont, bien antérieurement à l'expérience de Michelson, divers savants s'étaient préoccupés. Ainsi une théorie avait été proposée dans laquelle l'éther est regardé comme un fluide compressible et soumis à la gravité, de telle sorte qu'il se condense autour de la Terre comme un gaz. A la vérité, il est nécessaire d'introduire un glissement, mais la vitesse de la Terre par rapport à celle de l'éther est très petite, si la condensation est suffisamment grande. La complication de la théorie n'a pas permis de continuer dans cette voie.

Dans tout ce qui précède nous avons parlé d'éther, admettant l'existence d'un tel fluide, comme le faisait couramment Michelson. Celui-ci, dans une conférence faite en 1927 au Mont Wilson, parle avec émotion du vieil éther bien aimé (*beloved old ether*), ajoutant que ce mystérieux fluide est aujourd'hui à peu près abandonné, mais que personnellement il a du mal à renoncer à ce vieil amour. Comment expliquer le résultat négatif de l'expérience de Michelson? Peu après l'expérience de celui-ci, Fitzgerald et Lorentz ont simultanément proposé une explication reposant sur l'hypothèse de changements dans les dimensions de la matière dus à son mouvement à travers l'éther, changements qui d'ailleurs ne seraient pas mesurables, puisque l'appareil de mesure se contracterait lui aussi. Lorentz fut ainsi conduit à un système d'équations, connu sous le nom de transformations de Lorentz, système exprimant en réalité que par suite de changements convenables dans les longueurs et les temps, il n'y a pas de variations dans les phénomènes optiques à l'intérieur d'un système animé d'un mouvement de translation uniforme. Usant de la même transformation, mais changeant complètement le point de vue, Einstein fondait peu après la doctrine dite alors de la relativité restreinte, où une hypothèse fondamentale est que dans tout système la vitesse de la lumière est une constante universelle, indépendante du mouvement de translation uniforme de ce système. Nous dirons tout à l'heure un mot de cette question de la relativité, mais revenons pour le moment au physicien américain.

*
* *

Un travail de Michelson, sur la mesure du diamètre réel de certaines étoiles mérite une mention toute particulière. On sait qu'il est impossible de mesurer au micromètre les diamètres apparents des étoiles comme on le fait pour les planètes. Au foyer d'un objectif, la diffraction étale la lumière reçue d'un point lumineux en une tache centrale lumineuse entourée d'anneaux. Le diamètre de cette tache est

sans rapport avec le diamètre de l'astre; il ne dépend que du diamètre de l'objectif et de la couleur de la lumière envisagée. Il a donc paru longtemps impossible de connaître le diamètre réel d'une étoile.

En 1867, dans un rapport sur un prix Bordin à l'Académie, Fizeau fit incidemment une remarque indiquant une voie possible pour la solution de ce difficile problème : « Il existe, écrit-il, pour la plupart des phénomènes d'interférence, une relation remarquable et nécessaire entre la dimension des franges et celle de la source lumineuse, en sorte que des franges d'une ténuité extrême ne peuvent prendre naissance que lorsque la source de lumière n'a plus que des dimensions angulaires presque insensibles; d'où, pour le dire en passant, il est peut-être permis d'espérer que, en s'appuyant sur ce principe, et en formant par exemple au moyen de deux larges fentes très écartées, des franges d'interférence au foyer des grands instruments destinés à l'observation des étoiles, il deviendra possible d'obtenir quelques données nouvelles sur les dimensions angulaires de ces astres. » En 1878, M. Stephan, alors Directeur de l'Observatoire de Marseille, utilisa le premier la suggestion profonde de Fizeau, en remarquant que, si l'on vise un astre, dont le diamètre apparent est extrêmement petit, avec une lunette devant l'objectif de laquelle est disposé un écran percé de deux fentes écartées, on voit apparaître au foyer des franges d'interférence traversant la tache de diffraction. Au contraire, si l'astre a un diamètre apparent sensible, à chaque direction rencontrant l'astre correspond un système de franges, et ces systèmes empiètent les uns sur les autres; une expression simple où figure la longueur d'onde de la lumière de l'astre et la distance des fentes correspondant à la disparition des franges fait connaître le diamètre apparent de l'astre. Un écran percé de deux fentes distantes de $0^m,65$ fut disposé en avant du télescope de $0^m,80$ de l'Observatoire de Marseille, mais la distance des fentes était trop faible, et les franges se montrèrent toujours dans l'observation des plus belles étoiles du ciel; il en résultait qu'elles avaient toutes un diamètre apparent inférieur à $0'',15$.

En 1891, Michelson, reprenant avec plus de précision la théorie,

appliqua la méthode interférentielle à la recherche des diamètres des satellites de Jupiter avec une lunette de 0^m,91. Il s'agissait là de diamètres de 0",5 à 1". Les nombres trouvés furent en parfait accord avec les résultats donnés par les mesures micrométriques. M. Hamy, perfectionnant aussi de son côté la théorie, obtenait les mêmes résultats avec le grand équatorial coudé de l'Observatoire de Paris.

Dans toutes ces observations, la distance des deux faisceaux interférents ne pouvait dépasser le diamètre de l'objectif des instruments utilisés; nous entendons d'ailleurs ici par objectif le miroir ou la lentille, suivant qu'il s'agit d'un réflecteur ou d'un réfracteur. A l'Observatoire du Mont Wilson le diamètre du plus grand objectif utilisé était de 2^m,50. On se trouvait ainsi bien limité, et l'on ne pouvait guère espérer obtenir le diamètre apparent d'une étoile.

Comment faire interférer deux faisceaux de distance initiale supérieure à la dimension de l'objectif employé? Michelson, avec son audace et son sens expérimental profond, eut une idée extrêmement heureuse. Deux miroirs plans situés à une grande distance recueillent les deux faisceaux initiaux éloignés et les réfléchissent sur deux autres miroirs qui les renvoient, parallèles mais rapprochés, dans l'objectif de la lunette; la théorie doit d'ailleurs subir une modification, la distance des fentes étant remplacée par la distance des miroirs extérieurs. Avec ce remarquable dispositif, il n'y a plus besoin de lunettes ou de télescopes de dimensions gigantesques. C'est en 1920 que fut mesuré pour la première fois le diamètre apparent d'une étoile. Un interféromètre du type précédent avec miroirs extérieurs mobiles, dont la distance pouvait aller jusqu'à six mètres, fut placé à l'extrémité de l'armature du grand télescope du Mont Wilson. On peut penser que l'installation d'un interféromètre de près de quatre cents kilogrammes à l'extrémité du long tube d'un télescope ne se fit pas sans difficultés, non plus que le réglage de l'appareil.

L'astre choisi, suivant le conseil de l'éminent astronome anglais Eddington, avait été *Bételgeuse*, belle étoile rouge et brillante de la Constellation d'Orion. On devait choisir une étoile qui, quoique

brillante, avait une surface faiblement lumineuse, son éclat apparent élevé se trouvant alors dû à une grande surface de rayonnement. L'examen spectroscopique avait montré que la température superficielle de Bételgeuse est d'environ trois mille degrés, et le pouvoir rayonnant de la surface de l'astre peut alors être obtenu. De tout cela, avec les hypothèses habituelles à ce genre de problèmes, on pouvait conclure que le diamètre angulaire de l'étoile était de $0'',051$. Il y avait donc lieu d'espérer que le dispositif de Michelson serait susceptible de donner effectivement le diamètre angulaire de Bételgeuse.

Pendant l'observation, la visibilité des franges alla en diminuant à mesure que les deux miroirs extérieurs étaient éloignés l'un de l'autre. Un de ceux qui assistaient à l'expérience, M. Georges Hale, a dit l'émotion des astronomes attendant le moment précis où les franges allaient disparaître; la disparition eut lieu pour une distance des miroirs d'un peu plus de trois mètres. Ce fut une grande joie parmi les assistants; joie austère sans doute, comme en procure aux savants la solution d'un problème vainement cherché depuis longtemps. En se servant des formules que nous avons rappelées, et en évaluant à 5750 angströms la longueur d'onde moyenne de la lumière de Bételgeuse, le diamètre angulaire fut trouvé égal à $0'',047$, en accord satisfaisant, on le voit, avec la prévision d'Eddington. La parallaxe de Bételgeuse étant connue, et par suite sa distance à la Terre, on déduit facilement du diamètre apparent de l'astre son diamètre réel. Il est approximativement égal au diamètre de l'orbite de Mars, ou à *trois cents* fois le diamètre du Soleil. Des mesures analogues ont été faites depuis pour *Arcturus*, étoile de première grandeur de la Constellation du Bouvier. Son diamètre est égal à *vingt-huit* fois celui du Soleil. On a également obtenu le diamètre de l'étoile *Antarès* de la Constellation du Scorpion, qui a un diamètre égal à *quatre cent cinquante* fois celui du Soleil; celui-ci est bien petit à côté de cette étoile géante. Récemment un interféromètre permettant de mettre les deux miroirs extrêmes à une distance de quinze mètres a été placé sur le grand équatorial du Mont Wilson et les mesures préliminaires ont été pleinement satisfaisantes.

brillante, avait une surface faiblement lumineuse, son éclat apparent élevé se trouvant alors dû à une grande surface de rayonnement. L'examen spectroscopique avait montré que la température superficielle de Bételgeuse est d'environ trois mille degrés, et le pouvoir rayonnant de la surface de l'astre peut alors être obtenu. De tout cela, avec les hypothèses habituelles à ce genre de problèmes, on pouvait conclure que le diamètre angulaire de l'étoile était de $0'',051$. Il y avait donc lieu d'espérer que le dispositif de Michelson serait susceptible de donner effectivement le diamètre angulaire de Bételgeuse.

Pendant l'observation, la visibilité des franges alla en diminuant à mesure que les deux miroirs extérieurs étaient éloignés l'un de l'autre. Un de ceux qui assistaient à l'expérience, M. Georges Hale, a dit l'émotion des astronomes attendant le moment précis où les franges allaient disparaître; la disparition eut lieu pour une distance des miroirs d'un peu plus de trois mètres. Ce fut une grande joie parmi les assistants; joie austère sans doute, comme en procure aux savants la solution d'un problème vainement cherché depuis longtemps. En se servant des formules que nous avons rappelées, et en évaluant à 5750 angströms la longueur d'onde moyenne de la lumière de Bételgeuse, le diamètre angulaire fut trouvé égal à $0'',047$, en accord satisfaisant, on le voit, avec la prévision d'Eddington. La parallaxe de Bételgeuse étant connue, et par suite sa distance à la Terre, on déduit facilement du diamètre apparent de l'astre son diamètre réel. Il est approximativement égal au diamètre de l'orbite de Mars, ou à *trois cents* fois le diamètre du Soleil. Des mesures analogues ont été faites depuis pour *Arcturus*, étoile de première grandeur de la Constellation du Bouvier. Son diamètre est égal à *vingt-huit* fois celui du Soleil. On a également obtenu le diamètre de l'étoile *Antarès* de la Constellation du Scorpion, qui a un diamètre égal à *quatre cent cinquante* fois celui du Soleil; celui-ci est bien petit à côté de cette étoile géante. Récemment un interféromètre permettant de mettre les deux miroirs extrêmes à une distance de quinze mètres a été placé sur le grand équatorial du Mont Wilson et les mesures préliminaires ont été pleinement satisfaisantes.

Devant les beaux résultats obtenus par Michelson dans la mesure des diamètres des étoiles, on reste saisi d'admiration pour l'expérimentateur et le technicien hardi que fut notre Confrère, et cette phrase de Claude Bernard revient à l'esprit qu'« une bonne technique rend quelquefois plus de service à la science que le perfectionnement des hautes spéculations théoriques ». L'idée première, nous l'avons rappelé, jetée à la fin d'un rapport, était due à Fizeau; mais il y avait bien loin de là à la réalisation expérimentale.

*
* *

La recherche de la vitesse de la lumière n'a pas cessé de préoccuper Michelson pendant toute sa vie. Nous avons dit qu'il avait repris l'expérience de Foucault avec le miroir tournant en lui apportant d'importants perfectionnements. Il était convaincu qu'on pouvait obtenir une meilleure approximation. Il y avait intérêt à substituer au miroir tournant un prisme réfléchissant sur ses diverses faces; et il était essentiel que le trajet parcouru par la lumière après ses diverses réflexions fût le plus grand possible. Michelson appliqua aussi une méthode analogue à celle de Fizeau en opérant entre le Mont Wilson et le mont San-Antonio, situé à une distance de 35 kilomètres. Si satisfaisants que fussent ces résultats, Michelson ne s'en contenta pas; ils donnaient la vitesse de la lumière dans l'air, d'où pouvait à la vérité se déduire la vitesse dans le vide; mais il était intéressant d'obtenir directement cette vitesse. Un tube fut construit d'une longueur de 1600 mètres et de 30 centimètres de diamètre. La pression de l'air dans le tube fut diminuée autant qu'il était possible, de sorte que pratiquement on obtint pour la première fois la vitesse dans le vide; on trouva 299-796 kilomètres, l'erreur étant certainement très inférieure à un dix-millième.

Dans tout ce qui précède, il s'agissait de la vitesse à la surface de la Terre. J'ai rappelé plus haut que, dans l'évaluation de la vitesse de la

lumière, on a employé d'abord une méthode astronomique avec les satellites de Jupiter; on y est arrivé aussi plus tard par l'observation des vitesses radiales d'étoiles voisines de l'écliptique, l'observation étant faite aux époques de quadrature avec le Soleil. Or les méthodes astronomiques semblent donner pour la lumière une vitesse supérieure à celle que donnent les observations terrestres. On a même annoncé que la constante de l'aberration, en rapport étroit avec la vitesse de la lumière, dépendait du type spectral de l'étoile observée pour l'obtenir. Il ne faut pas oublier non plus que, dans les observations célestes, on mesure la vitesse dans le voyage d'un point à un autre, tandis que dans toutes les mesures faites à la surface de la Terre, il s'agit de temps employés pour l'aller et le retour. Au point de vue théorique, il y aurait grand intérêt à avoir séparément dans les observations terrestres les vitesses d'aller et de retour, mais l'expérience paraît extrêmement difficile.

Parmi les travaux de Michelson il faut rappeler une expérience analogue à celle de Sagnac avec un plateau tournant sur lequel est placé un interféromètre, mais chez Michelson le plateau tournant est, peut-on dire, la Terre elle-même, et il s'agit de la rotation de celle-ci autour de son axe. Dans l'interféromètre réalisé par notre Confrère les deux rayons lumineux suivent en sens inverses les côtés d'un tube disposé suivant les côtés d'un rectangle, où le vide avait été fait. Il importe peu ici d'adopter la théorie de l'éther stationnaire ou celle de la relativité, l'effet étant du premier ordre. Le déplacement attendu des franges par le fait de la rotation est donné par une expression contenant en particulier l'aire du rectangle. L'expérience consiste à comparer la position des franges avec celles que donne un second circuit convenablement disposé enveloppant une aire beaucoup plus petite que le premier. Le résultat observé est en accord très satisfaisant avec le calcul. Celui-ci donnait à Michelson un déplacement de 0,236 de frange, et l'observation donne 0,230. En un sens, on peut dire que cette curieuse expérience est, réalisée avec la lumière, le pendant de l'expérience classique faite par Foucault avec le pendule, pour démontrer la rotation de la Terre.

La géophysique attira aussi l'attention de Michelson. Les expériences qu'il entreprit en 1916 concernent à la fois l'étude des marées et celle de la déviation de la verticale. Les attractions solaire et lunaire produisent en chaque point de notre planète le phénomène des marées de l'écorce terrestre et les déviations très petites de la verticale. Il mesurait, à l'aide de procédés optiques très sensibles, les variations de niveau qui se produisent dans l'eau d'un canal souterrain de 152 mètres de longueur et de 0^m, 21 de diamètre; l'amplitude observée était d'ailleurs de quelques microns (de six à onze). On peut d'autre part calculer ce qu'eût été la dénivellation si la Terre était complètement rigide. Or le phénomène observé par Michelson s'est trouvé réduit environ à la moitié de ce qu'il eût été dans l'hypothèse de la rigidité complète, ce qui conduit pour notre globe à un module de rigidité du même ordre que celui donné autrefois par Lord Kelvin.

*
* *

Quelques-uns des travaux de Michelson nous l'ont montré cherchant toujours à obtenir avec des moyens simples une précision supérieure à celle déjà obtenue. Sa plus grande ambition fut peut-être d'obtenir la vitesse de la lumière à un kilomètre près par seconde, et il travailla sans cesse au perfectionnement des méthodes permettant d'obtenir une meilleure approximation. Ce fut chez lui une véritable passion; peu de jours avant sa mort, se sentant déjà gravement atteint, il faisait encore des plans d'expériences.

Tout ce qu'a publié Michelson mérite d'être médité; il dédaignait de faire connaître des résultats qui lui paraissaient d'importance secondaire. Il y avait chez lui un artiste; une belle expérience était pour lui une œuvre d'art, et peut-être n'était-il pas loin de penser, comme dit Fontenelle à propos de Leibnitz, que la façon de découvrir est plus précieuse que la plupart des choses qu'on

découvre. Il lui semblait, a-t-il écrit, que l'on doit regarder la recherche scientifique, comme un peintre regarde son tableau, un poète son poème, un musicien sa musique. Ces travaux augmentent les plaisirs de l'existence, et les vraies raisons de l'activité de l'investigateur sont, pensait-il, l'amour de son œuvre en elle-même. Quand on lui demandait pourquoi il voulait faire de nouvelles expériences sur la vitesse de la lumière, il invoquait d'abord l'intérêt de la science, et il ajoutait ensuite en riant : « Et puis la vraie raison, c'est que *c'est un jeu si amusant.* »

Notre Confrère aimait des jeux variés, le billard, le tennis, où il se signala dans des matches célèbres. Il était aussi excellent violoniste, mais c'est dans le dessin et la peinture qu'il trouvait un de ses plus grands plaisirs ; en se promenant il emportait toujours sa boîte de couleurs. George Hale m'a raconté que, si après avoir pris sa retraite comme professeur à l'Université de Chicago, il vint à Pasadena en Californie, ce n'est pas seulement à cause des moyens de travail qu'il pouvait trouver dans le célèbre Observatoire du Mont Wilson, mais à cause de la beauté des paysages de Californie, convenant mieux au talent d'un paysagiste que les bords du lac Michigan.

Michelson n'avait rien de ces théoriciens, pour qui le monde se réduit à un ensemble de formules mathématiques. Certes, il appréciait les efforts qui tendent sur plus d'un point à transformer notre vision des choses, mais il admirait surtout des expériences faites dans des conditions bien déterminées et d'un degré assuré d'approximation. Les anciens points de vue théoriques, où s'était placée en Optique la majorité des physiciens du siècle dernier, lui avaient suffi dans les calculs relatifs à ses expériences. Une de celles-ci, devenue classique sous le nom d'expérience de Michelson et Morley, eut, nous l'avons dit, un retentissement immense. Le résultat négatif obtenu l'avait étonné et déçu ; peut-être restait-il convaincu, que, comme l'a dit un physicien américain bien connu, M. Compton, « s'il doit y avoir des ondulations, il doit y avoir un milieu dans lequel ces ondulations se produisent ».

Quoi qu'il en soit, parlant un jour des conséquences relativistes de sa célèbre expérience, il lui est arrivé, paraphrasant un mot bien connu, de dire avec son humour habituel : « Je n'ai pas voulu cela. » Dans cette expérience, on ne se risque guère en disant que c'est le degré d'approximation susceptible d'être atteint plutôt que le résultat même qui l'intéressait. Il attachait un prix particulier à ses travaux sur la mesure du diamètre réel des étoiles, dans lesquels il avait déployé tant d'ingéniosité expérimentale; ce fut certes là, pour reprendre ses propres expressions, *un jeu bien amusant*.

Albert Michelson mourut à Pasadena, en Californie, le 9 mai 1931, travaillant jusqu'à son dernier jour.

*
* *

Après cette analyse des principaux travaux de notre ancien Associé étranger, poursuivons l'étude succincte de l'évolution des idées sur la lumière, commencée au début de ce discours. La lumière et l'électricité ont été longtemps deux domaines entièrement distincts. Le physicien anglais Maxwell réussit à établir un rapprochement entre ces deux parties de la science, et il fut conduit à l'idée d'une onde électromagnétique se propageant avec la vitesse de la lumière. Il était naturel de regarder comme identiques l'éther et le fluide inducteur que l'on supposait présider aux actions électromagnétiques, et d'envisager la lumière comme un phénomène électromagnétique. C'est ce que fit Maxwell dans sa théorie électromagnétique de la lumière en regardant une onde lumineuse comme produite par une suite de courants électriques alternatifs changeant de sens un nombre immense de fois par seconde. Les vues géniales de Maxwell ont d'ailleurs conservé un caractère hypothétique jusqu'à ce que le physicien allemand Hertz ait réalisé en 1888 les expériences mémorables sur la propagation des ondes auxquelles son nom est resté attaché et que la télégraphie sans fil a fait connaître à tous.

Avec cet éther quelque peu modifié, le Chapitre des ondulations prenait une extension considérable. Ce n'est pas que l'électricité soit devenue en quelque sorte un mode de l'éther, comme l'avait fait la lumière avec l'ancienne théorie ondulatoire. Au contraire, après quelques hésitations sur le mode d'existence du fluide électrique, l'atome d'électricité négative ou *électron* est devenu pour les physiciens modernes une *réalité*. Le physicien hollandais Lorentz compléta les équations de Maxwell par l'introduction de termes où figuraient la vitesse et la densité des masses électriques en mouvement. Le support du champ électromagnétique, auquel on conserve le nom d'éther, est immobile. Il agit sur les électrons, mais les électrons n'exercent sur lui aucune action mécanique, et la matière qui se meut à travers l'éther exerce une action électromagnétique par les charges électriques qu'elle porte. On voit combien le fluide inducteur de Maxwell-Lorentz diffère de l'éther de Fresnel et de la plupart des physiciens du siècle dernier. Une étape importante était franchie dans l'histoire des théories sur la lumière.

Les idées de Maxwell-Lorentz se sont montrées particulièrement propres à expliquer l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre par rapport au fluide inducteur au moyen d'une expérience optique faite à sa surface, conformément à la célèbre expérience de Michelson décrite plus haut. C'est ce qui résulte du fait que les équations de Lorentz ne changent pas quand on effectue sur les longueurs et les temps des transformations linéaires formant un groupe, et qu'on modifie en même temps convenablement les forces électrique et magnétique ainsi que la densité électrique. Ce groupe de transformations correspond essentiellement à des mouvements de translation uniforme du système. Les nombres mesurant dans celui-ci les longueurs et les temps varient avec sa vitesse; on en achève la détermination en prenant comme unité de longueur une longueur relative à un phénomène physique produit dans le système, par exemple la longueur d'onde d'une radiation bien spécifiée émise par une source rattachée au système, et pour unité de temps la

période correspondante à cette onde (1). Seule n'est pas changée dans tout cela la vitesse de la lumière, et précisément Einstein, renversant en quelque sorte la théorie de Lorentz, prit pour point de départ : la vitesse de la lumière, pour un observateur expérimentant dans un système animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à un autre système, est une constante universelle indépendante de ce mouvement. La lumière a ainsi un rôle unique et privilégié parmi les autres phénomènes naturels. Nous nous sommes d'ailleurs borné dans ce qui précède à la relativité dite jadis *relativité restreinte*, c'est-à-dire qu'on a supposé l'absence de toute influence extérieure, gravitationnelle ou autre. Einstein a fait de cette relativité d'immenses généralisations, mais le point qui nous intéresse surtout ici dans l'évolution des idées sur la lumière, c'est que, dans la théorie de la relativité, on renonce à toute considération d'une substance transmettant la lumière, en se bornant à des hypothèses de nature géométrique, telles que la constance de la vitesse de la lumière dans la relativité restreinte et la réciprocité des deux systèmes en présence. Il a ainsi semblé qu'était réalisé le rêve de Descartes : l'étendue est l'essence des choses matérielles, et la Physique se ramène à une géométrie.

Nous avons toujours parlé jusqu'ici de *lumière*. C'est le mot *radiation*, qui revient le plus souvent aujourd'hui dans les travaux des physiciens. Qu'entend-on par là d'une manière générale ? On appelle de ce nom toutes les formes sous lesquelles l'énergie peut se propager dans le vide sans support matériel. Les radiations *lumineuses* constituent une forme particulière de radiations. Il y en a bien d'autres : radiations ultraviolettes, radiations infrarouges, rayons X, ondes de la télégraphie sans fil, etc.... On entend maintenant par *Optique* l'étude des diverses radiations, le mot *lumière* recevant ainsi une large extension.

Une conséquence extrêmement importante déduite par Einstein de

(1) Dans un article de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* de 1922, j'ai insisté sur ces différents points.

la théorie de la relativité concerne la relation entre la *masse* et l'*énergie*. La conservation de la masse était depuis Newton un postulat fondamental, et l'on sait l'importance qu'elle eut dans l'œuvre de Lavoisier. On admet aujourd'hui que la masse d'un système ne se conserve que si le système n'échange avec l'extérieur ni matière ni énergie. Une relation très simple existe entre la variation de la masse et la variation de l'énergie, la première étant égale à la seconde divisée par le carré de la vitesse de la lumière. Citons comme application de ces notions la remarque faite par M. Langevin que la masse atomique de l'hydrogène est 1,0077, alors que celle de l'hélium formé de quatre atomes d'hydrogène est égale à 4, la condensation ayant donné des pertes d'énergie et par suite des pertes de masse. En fait la variation de masse est le plus souvent très petite, même quand il y a une variation considérable d'énergie, à cause de la grandeur colossale du carré de la vitesse de la lumière. La corrélation entre la matière et l'énergie, que nous venons de signaler, eût paru bien étrange aux physiciens d'il y a cinquante ans, qui les considéraient comme des entités absolument distinctes.

*
* *

L'opposition est ancienne entre les idées de *continuité* et de *discontinuité*; elle a commencé dès l'antiquité grecque. La plupart des théories de la Mécanique et de la Physique se sont longtemps condensées dans des types analytiques qui supposent la continuité, soit que celle-ci fût admise dès le début, soit qu'elle apparût comme une approximation nécessaire pour les calculs, ou qu'elle intervînt par le détour des probabilités.

Une ère nouvelle s'ouvrit avec le physicien allemand Planck, quand il étudia le rayonnement thermique des corps incandescents, qu'il regardait comme formés de petits résonateurs entrant en vibration, mais en supposant que les énergies de ces résonateurs *croissent par*

saccades au lieu de varier d'une manière continue, comme on l'avait admis jusque-là; il fut ainsi conduit à des courbes de distribution dans le spectre conformes à l'expérience, ce que ne donnaient pas les théories classiques supposant la continuité. Il n'y a pas d'ailleurs à parler d'atome d'énergie; c'est le quotient de l'énergie par la fréquence de la vibration, qui est multiple d'une certaine constante, universelle, dite *quantum d'action*. On a donné à cette constante, que l'on désigne par h , le nom de constante de Planck; sa valeur généralement admise est $6,55 \cdot 10^{-27}$ dans le système C. G. S. En désignant par ν une fréquence, $h\nu$ est une énergie et, pour une fréquence ν , les énergies échangées sont des multiples de $h\nu$.

Cette notion fut ensuite élargie, quand on fit une étude approfondie de l'effet photoélectrique. Si la lumière ultraviolette tombe dans le vide sur un métal, celui-ci émet des électrons possédant une vitesse dépendant seulement de la longueur d'onde de la lumière, tandis qu'on pouvait s'attendre à ce qu'elle dépendit aussi de l'intensité du rayonnement lumineux. On a expliqué ce résultat en admettant que l'énergie lumineuse reste concentrée sous forme de *quanta* déterminés, dépendant seulement de la longueur d'onde; c'est la théorie des *quanta de lumière* ou *photons*, proposée pour la première fois par Einstein. Chacun de ces quanta de lumière, en rencontrant le métal, communique à l'un des électrons qui s'y trouvent son énergie sous forme d'énergie cinétique, abstraction faite seulement du travail que doit accomplir l'électron pour quitter le métal. L'intensité de la lumière qui produit le phénomène n'influe pas sur l'énergie des électrons détachés, mais seulement sur leur nombre.

Tout ce qui précède nous ramène donc à une théorie d'émission, où la lumière apparaît comme formée de particules, et où l'énergie de chacune de ces particules est, pour la fréquence ν , regardée comme égale à $h\nu$, la quantité de mouvement étant $\frac{h\nu}{c}$ (c représentant la vitesse de la lumière).

La théorie des photons s'est montrée très féconde dans de nombreuses questions touchant à la constitution de la matière. On doit

admirer avec quelle audace, au moins dans une première approximation, on applique à des chocs entre matière et photons les lois du choc de la mécanique rationnelle la plus classique. On donne ainsi une explication sommaire des phénomènes si importants connus sous le nom d'effet *Raman* ⁽¹⁾ et d'effet *Compton*.

Les photons cependant sont loin de suffire à l'explication de tous les phénomènes lumineux. On ne peut pas renoncer aux ondes, qui paraissent indispensables pour les phénomènes d'interférence. Le sujet a bientôt débordé l'Optique, et une mécanique ondulatoire a pris naissance en 1924 avec un travail mémorable de M. Louis de Broglie. Nous bornant ici aux phénomènes lumineux, entendus au sens général qui a été indiqué, nous avons des ondes, ne transportant d'ailleurs pas d'énergie, qui sont liées aux photons. Cette liaison, qu'expriment des relations analytiques complexes, où figurent des équations différentielles, devient singulièrement schématique, quand on veut en tirer une représentation spatiale qui ne donne que des images plus ou moins lointaines. Il semble, dans ces questions, que toute théorie reposant sur un modèle tangible ou visuel finit par conduire à une contradiction. Seules, des constructions logiques sans support tangible ou visuel et s'appuyant en fait sur des abstractions mathématiques, ont plus de chance d'échapper à une contradiction. Une des images proposées jadis par M. Louis de Broglie a été la suivante : un nuage de photons étant envisagé, les trajectoires de ces corpuscules tantôt

(1) Indiquons sommairement le raisonnement pour l'effet *Raman*. Un quantum de lumière de fréquence ν possède l'énergie $h\nu$. Quand la lumière arrive sur la matière, il y a collision entre les quanta lumineux et les molécules matérielles. Supposons que celles-ci soient susceptibles d'osciller avec une fréquence m ; l'énergie indispensable pour l'amorçage des oscillations est hm . Lors de la diffusion de la lumière par la matière, il y a échange d'énergie, d'où : une lumière diffusée soit avec quantum $h(\nu + m)$, soit avec quantum $h(\nu - m)$. On a donc une lumière diffusée soit avec une fréquence $\nu + m$, soit avec une fréquence $\nu - m$; c'est là le phénomène de *Raman*. L'explication est plus complexe pour l'effet *Compton*: il s'agit là de la diffusion des rayons X à la surface d'un solide. On doit étudier, dans le même ordre d'idées, l'action d'un quantum de rayons X sur un électron libre immobile, ou très faiblement lié à l'atome dont il fait partie.

convergent et tantôt divergent, d'où une densité variable du nuage. C'est ainsi qu'on peut expliquer les interférences; beaucoup de photons passent où l'ancienne théorie prévoyait un maximum de lumière, et peu de photons là où il y avait un minimum. Dans tout cela l'onde n'aurait pas de réalité physique; elle n'a, peut-on dire, qu'une existence analytique permettant de prévoir dans une certaine mesure le déplacement des photons.

Nous avons déjà parlé de l'électron, c'est-à-dire du corpuscule élémentaire d'électricité négative. Un physicien américain, M. Anderson, a plus récemment découvert un corpuscule élémentaire d'électricité positive, étudié en France par M. Thibaud et par M. et M^{me} Joliot. On l'appelle généralement le *positon*, l'ancien électron étant souvent dénommé aujourd'hui *négon*. Ils possèdent une masse propre (masse au repos), qui est environ la deux-millième partie de la masse de l'atome d'hydrogène, avec des charges de même valeur absolue mais de signes contraires.

Quand des particules portant des charges électriques se déplacent rapidement dans un gaz humide, elles jalonnent leur parcours par un certain nombre d'ions, et l'on aperçoit par détente des trajectoires de brouillard. Les mêmes circonstances ne se présentent pas dans le parcours des radiations; pour celles-ci comme pour les particules neutres, les trajectoires sont invisibles. On fut ainsi conduit à penser que le corpuscule de lumière était formé de deux charges électriques de signes opposés. Ce *photon* aurait une masse pratiquement nulle, en fait extrêmement petite par rapport à celle de l'atome d'hydrogène, mais sa vitesse serait très voisine de celle de la lumière, condition nécessaire pour qu'il puisse avoir une énergie lui permettant de se manifester. Cette représentation s'est cependant montrée bientôt insuffisante; il y manque notamment certains éléments de symétrie. La théorie développée par le physicien anglais Dirac, de l'électron magnétique a ouvert des voies nouvelles. On a été conduit à admettre l'existence d'un corpuscule électriquement neutre, qui a reçu de M. Fermi le nom de *neutrino*, et dont la masse propre serait négligeable; on donne aussi

à ce corpuscule le nom de *ergon* avec M. Francis Perrin. Au *neutrino* s'oppose l'*antineutrino*, autre corpuscule qui serait par rapport à lui, dans la théorie de Dirac, ce qu'est le positon par rapport au négaton. C'est avec ces éléments que M. Louis de Broglie a proposé de former le photon, qui résulterait de l'association des deux *neutrinos* (ou *ergons*) antiparallèles, que nous venons d'indiquer. Il semble que nous ayons là les vues les plus récentes sur la constitution du photon.

On sait que dans les idées modernes les constituants universels de la matière sont des charges électriques. Dans la théorie de Bohr, un atome d'une substance quelconque est formé d'un noyau renfermant des protons et des négatons, et il y a autour de ce noyau des négatons satellites, le tout ayant une charge électrique neutre si l'atome est neutre. On tend aujourd'hui à considérer que le proton est complexe, formé d'un positon et d'un *neutron*, ce dernier étant un corpuscule neutre de masse à peu près égale à l'unité. L'effet photoélectrique, qui a joué un rôle capital dans le développement de toutes ces spéculations sur la lumière, consiste en ce que le photon livre toute son énergie à la matière sur laquelle est dirigée la radiation. Le photon se transforme alors en corpuscule, l'énergie de la radiation donnant naissance à un couple d'électrons de signes contraires; *il y a ainsi annihilation du photon*. Le phénomène inverse s'était présenté avec la dématérialisation d'un corpuscule dans une ampoule productrice de rayons X. Là, des négatons rapides arrivent sur l'anticathode et donnent les rayons désignés sous ce nom; on a là un exemple de conversion de l'électricité en radiation et par suite *de la matière en rayonnement*. Cette même conversion a été obtenue d'une manière extrêmement nette par M. Thibaud dans ses expériences sur les positons.

Dans la théorie moderne de la lumière se conjuguent, comme nous venons de le voir, le point de vue corpusculaire et le point de vue ondulatoire. Plus d'une difficulté subsiste sans doute, mais l'édifice bâti par d'illustres théoriciens de la physique est imposant; plus d'une conséquence déduite de ces audacieuses et parfois étranges spéculations a été vérifiée par l'expérience. On pourra demander dans quelle mesure

existent les ondes et les corpuscules dont nous venons de parler. Il est possible, vraisemblable même, que certains de ces éléments n'aient qu'une existence mathématique, si j'ose dire. Et ici une remarque générale est à faire sur le mot *réalité*. Quand sommes-nous portés à attribuer une réalité aux éléments qui se présentent dans les théories de la Physique? Ce sera quand, comme conséquences de ces théories, l'expérience nous aura amenés à faire correspondre des nombres déterminés à des propriétés de ces éléments; c'est ainsi que l'on a été conduit à poser l'existence des électrons pour lesquels des expériences variées ont donné des valeurs numériques concordantes pour la charge et pour la masse. Quoique énoncée peut-être sous une forme trop absolue, elle reste vraie, dégagée de tout sens mystique, cette maxime du Pythagoricien Philolaüs proclamant que « toutes choses accessibles à notre connaissance possèdent un nombre, car sans celui-ci nous ne pouvons rien comprendre ni connaître ». Il est exact que, plus une science se développe, plus on y voit grandir le rôle du nombre.

Est-ce à dire que cette *réalité* posée par le savant ait un caractère définitif? Les avatars de tant de théories montrent le contraire; tous les physiciens ont cru longtemps à la réalité d'un éther qui expliquait tant de phénomènes de l'Optique. Dans la physique relativiste, où l'on s'efforce de tout expliquer par les propriétés d'un espace à quatre dimensions, il semble, si l'on veut conserver un éther, que celui-ci ne pourra être autre chose que cet espace lui-même.

La nécessité de modifier, compléter, transformer nos théories scientifiques a fait dire parfois que nous passons par *une crise de la réalité*. Il y a eu des crises de la réalité dans tous les temps, comme le montre assez l'histoire de la philosophie et de la science depuis l'antiquité. Il faut reconnaître que, dans certaines parties de la Physique moderne, l'élément mathématique prend une place de plus en plus grande et que la *réalité* a chez elle une forme de plus en plus analytique, les représentations figurées devenant complètement insuffisantes. L'histoire des théories de la lumière, que nous venons d'esquisser, illustre suffisamment ces remarques. Il était plus commode sans doute de se repré-

senter un éther vibrant à travers lequel se déplacent des ondes, que d'envisager le cortège des équations aux dérivées partielles paraissant indispensables actuellement aux théoriciens de la lumière. Trouvera-t-on quelque jour une signification physique aux concepts que fournit le raisonnement mathématique? C'est une question qu'on peut réserver, si l'on veut. Pour le moment, rien ne paraît plus simple qu'un rayon de lumière, rien n'est en réalité plus complexe.

ÉMILE PICARD.

