
LES
THÉORIES DE L'OPTIQUE
ET
L'ŒUVRE D'HIPPOLYTE FIZEAU.

LECTURE FAITE DANS LA SÉANCE PUBLIQUE ANNUELLE DU 17 DÉCEMBRE 1923,

PAR
M. ÉMILE PICARD,
SECRÉTAIRE PERPÉTUEL.



MESSIEURS,

Des travaux récents sur la Relativité, qui ont remué beaucoup d'idées, et dont on a parlé plus ou moins judicieusement dans des milieux divers, invitent à jeter un coup d'œil sur l'histoire de certaines théories physiques et sur l'œuvre des physiciens qui ont contribué à leur développement.

Dans le domaine de l'Optique, la France peut citer avec fierté, au siècle dernier, les noms de Malus, d'Arago, de Fresnel, et les travaux de ces grands physiciens ont fait l'objet de Notices lues ici même dans

nos séances publiques. Il est un autre savant français, Hippolyte Fizeau, mort à la fin du siècle dernier, dont Arago a pu dire qu'il nous rendrait Fresnel; le nom de Fizeau, souvent cité dans les Mémoires récents consacrés à l'Optique, a singulièrement grandi dans ces dernières années. Après m'être arrêté un instant sur l'histoire antérieure des théories relatives à la lumière, je voudrais rappeler l'œuvre de cet illustre physicien et j'essaierai ensuite de dire comment ont évolué les idées des physiciens sur l'éther et les phénomènes lumineux.

I.

L'histoire des doctrines relatives à l'Optique pendant l'Antiquité offre peu d'intérêt scientifique. Nous ne nous demanderons pas ce que pouvait être la lumière, dont l'apparition mentionnée au début de la Genèse précédait la création du Soleil et des Étoiles. En Grèce, Démocrite professait la doctrine de l'émission, d'après laquelle la vision est causée par la projection de particules provenant des objets, et Lucrèce a développé cette théorie dans un poème célèbre. Les Pythagoriciens, au contraire, supposaient que l'œil projette hors de lui des rayons qui vont saisir les objets perçus, et un commentateur postérieur cite même à ce sujet l'empereur Tibère qui voyait clair la nuit, comme certains oiseaux de proie dont les yeux brillent dans les ténèbres. Les Platoniciens, s'efforçant de concilier des doctrines opposées, expliquaient la vision par la rencontre de rayonnements partant respectivement de l'œil et de l'objet, tandis que pour l'école péripatéticienne la lumière était regardée comme une *qualité* des corps lumineux, et au xvii^e siècle certains scholastiques regardaient encore la lumière comme un mouvement *luminaire* des corps lumineux, ce qui provoquait les railleries de Pascal. Si peu expérimentateurs qu'aient été les Anciens, ils connaissaient cependant les lois de la réflexion de la lumière et le phénomène de la réfraction. Les Traités d'Euclide sur l'*Optique* et sur la *Catoptrique* contiennent d'im-

portantes remarques sur les miroirs sphériques, dont Archimède, quelque douteuses que soient les anecdotes racontées à son sujet, s'est aussi occupé.

Il faut arriver à la Renaissance pour voir l'apparition de théories physiques. Galilée se demanda le premier, semble-t-il, si la lumière met un temps fini pour aller d'un point à un autre; il chercha même à réaliser une expérience pour en décider. Deux observateurs étant placés à une certaine distance, le premier envoyait un rayon de lumière au second qui le lui renvoyait immédiatement; du temps écoulé entre le départ et l'arrivée de la lumière pour le premier observateur devait se déduire la vitesse cherchée. Les techniques du temps ne permettaient pas évidemment de tirer un résultat d'une expérience qui, convenablement disposée, devait plus tard être féconde. Avec Descartes, nous voyons apparaître les théories optiques. À la vérité, il commence d'abord par déclarer dans sa *Dioptrique* qu'il n'est pas besoin de dire quelle est la nature de la lumière, et il pense qu'il suffit de se servir de comparaisons qui aident à la concevoir. L'une d'elles est celle du bâton, par l'intermédiaire duquel un aveugle sent les objets qui se rencontrent autour de lui. « La lumière, écrit Descartes, n'est autre chose dans les corps lumineux qu'un certain mouvement, ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux par l'entremise de l'air et des autres corps transparents, en même façon que le mouvement ou la résistance des corps, que rencontre cet aveugle, passe vers sa main par l'entremise de son bâton. » Il résultait, pour Descartes, de l'incompressibilité supposée du bâton que l'action doit passer instantanément d'un bout à l'autre de celui-ci; aussi la vitesse de la lumière est-elle nécessairement infinie. C'était là une des propositions essentielles du système du grand philosophe, à tel point qu'il ne craint pas de dire que, si elle était convaincue d'erreur, il serait prêt à avouer qu'il ne sait rien en philosophie. Descartes utilise encore la même comparaison pour donner une explication des couleurs. Nous pouvons, dit-il, avec un bâton nous rendre compte dans une certaine mesure de la nature des objets touchés; pareillement les couleurs

ne sont autre chose, dans les corps colorés, que les diverses façons dont ces corps transmettent le mouvement à nos yeux.

Dans son livre sur les *Météores*, Descartes cherche à pénétrer davantage dans le détail de l'explication des couleurs, en parlant des petites boules de la matière subtile, qui roulent de diverses façons dans les pores des corps terrestres, faisant naître ainsi des différences dans nos sensations de couleurs. Et il insiste avec force sur ce qu'il n'est pas besoin de supposer qu'il passe quelque chose de matériel depuis les objets jusqu'à l'œil, pour faire voir la lumière et les couleurs, s'inscrivant ainsi parmi les précurseurs de la théorie des ondulations, quoique, à la vérité, il ne considère pas la lumière comme un mouvement propagé par ondes successives, mais comme une pression transmise instantanément par l'intermédiaire d'un autre élément.

La découverte de la loi de la réfraction de la lumière a donné lieu à de vives polémiques, et, dès le xvii^e siècle, Descartes est accusé d'avoir, sans le citer, emprunté cette loi à Snellius. On peut aujourd'hui regarder comme établi que, si Snellius était arrivé à la loi des sinus, ce qui est douteux, Descartes la trouva de son côté par une voie toute théorique; mais il faut avouer que son raisonnement, où il assimile l'action de la lumière au mouvement d'une balle, et la surface de séparation de deux milieux à une toile faible et résistante, témoigne de la confusion qui régnait encore dans une mécanique très rudimentaire; en outre, il y avait dans la démonstration du philosophe quelque contradiction avec ses vues sur la propagation instantanée.

En même temps que Descartes, Fermat s'occupait d'Optique. Parmi les savants du xvii^e siècle, la physionomie de Fermat est particulièrement attachante. Conseiller au parlement de Toulouse, et grand jurisconsulte, Fermat est souvent cité par ses merveilleuses divinations sur la théorie des nombres, mais ses plus grands titres de gloire sont ailleurs. Son nom reste à jamais inscrit dans l'histoire du Calcul infinitésimal, et l'on doit souscrire à l'opinion de Lagrange et de Laplace, qui le regardaient comme le premier inventeur des nouveaux Calculs pour sa méthode de *maximis et minimis*. L'Optique lui est

aussi redevable d'un progrès considérable. Fermat n'avait jamais admis la validité des raisonnements de Descartes sur la réfraction. Il écrivait, en 1662, à M. de la Cambre. « Je vous ai dit autrefois que M. Descartes n'a jamais démontré son principe, car, outre que les comparaisons ne servent guère à fonder les démonstrations, il emploie la sienne à contresens, et suppose même que le passage de la lumière est plus aisé par les corps durs que par les rares, ce qui est apparemment faux. » Il est bien remarquable que Fermat ait trouvé la raison de la réfraction dans un principe général, d'après lequel la nature agit par les voies les plus courtes et les plus aisées. C'est de là qu'il déduit la loi des sinus, en recourant à sa méthode de *maximis et minimis* « qui expédie, dit-il, cette sorte de questions avec assez de succès ». Ainsi c'est à Fermat que l'on doit la première notion du principe de la moindre action, qui joue aujourd'hui un si grand rôle dans tant de questions de philosophie naturelle; en Optique, cette loi de minimum fut ensuite étendue au trajet d'un rayon lumineux à travers un milieu de réfringence variable. Fermat avait proposé la même expérience que Galilée pour déterminer la vitesse de la lumière. Mais ces tentatives n'intéressaient pas l'auteur du Discours de la Méthode, assuré de la propagation instantanée de la lumière par le fait que les éclipses de Lune peuvent être regardées comme se produisant 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 la propagation de la lumière.

C'est dans le ciel que furent d'abord réalisées des observations, que Galilée et Fermat n'avaient pu faire à la surface de la Terre. L'astronome danois Røemer, discutant les observations de Cassini sur les satellites de Jupiter, fut frappé du fait que la durée des révolutions du premier satellite, le plus rapproché de la planète, paraissait varier suivant que celle-ci était plus ou moins éloignée de la Terre; il ne craignit pas d'attribuer cette irrégularité au fait que la lumière se propage avec une vitesse finie, et il déduisit cette vitesse des différences des temps de simulations consécutives de ce satellite dans le cône d'ombre pro-

jeté par Jupiter à l'opposé du Soleil. La conclusion de Rømer était que la lumière met environ huit minutes un quart à parcourir le rayon de l'orbite terrestre. Cette détermination de la vitesse de la lumière était basée sur la connaissance, en valeur absolue, de la distance moyenne du Soleil à la Terre. Rømer admettait que le mouvement du premier satellite sur sa trajectoire est uniforme; aussi l'annonce qu'il fit en 1676 à l'Académie des Sciences provoqua-t-elle les critiques de Dominique Cassini, qui ne trouvait dans les observations de l'astronome danois que la preuve d'une irrégularité dans le mouvement du premier satellite de Jupiter, d'autant que les autres satellites alors connus ne conduisaient pas au même résultat. Mais peu à peu la confiance s'établit dans la théorie de Rømer, surtout quand la découverte de l'aberration de la lumière en 1728 vint cinquante ans plus tard apporter un témoignage décisif, les astronomes ayant alors unanimement jugé que le fait que les étoiles nous paraissent décrire la petite ellipse révélée à l'observation par Bradley pouvait s'expliquer seulement par la combinaison de la vitesse finie de la lumière avec la vitesse de translation de la Terre. De nombreuses années devaient s'écouler avant qu'une expérience faite sur notre planète fit connaître, indépendamment des phénomènes astronomiques, la valeur de la vitesse de la lumière.

La seconde moitié du xvii^e siècle vit se développer deux théories très différentes sur la nature des phénomènes lumineux. C'est dans son *Traité de la Lumière*, écrit pendant son séjour en France, que le Hollandais Huyghens proposa la théorie des ondulations. Comme Descartes, Huyghens n'admet pas dans les phénomènes lumineux un transport de substance, mais, à l'inverse du philosophe et avant même la publication des travaux de Rømer, il pose en principe que la lumière ne se transmet pas instantanément. C'est de la propagation du son qu'il rapproche la propagation de la lumière, et il montre comment on peut concevoir que la lumière s'étend successivement par ondes dans un milieu éthéré, formé de petites boules élastiques, milieu distinct de l'air qui transmet le son. Il invoquait 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 *ether* élastique, Huyghens déduit les lois de la réfraction de la lumière à la surface de deux corps isotropes, retrouvant ainsi pour le rapport des sinus la valeur que Fermat avait obtenue avec son principe du minimum; il en tire aussi une théorie de la double réfraction découverte par Erasme Bartholin dans le spath d'Islande. Le *Traité de la Lumière* de Christian Huyghens est une des plus admirables œuvres de la littérature scientifique de tous les temps.

La théorie des ondes allait être oubliée pendant un siècle et demi. Sous l'égide du grand nom de Newton, qui, après quelques hésitations, reprend l'idée des atomistes de l'antiquité, la théorie de l'émission triomphe, d'après laquelle de petits corpuscules, émanés des corps lumineux, produisent la vision en frappant notre rétine, ce qui n'empêchait pas d'ailleurs Newton d'admettre l'existence d'un milieu, animé de vibrations très rapides, dans lequel se meuvent les corpuscules, et déterminant ceux-ci à produire certains effets. L'objection principale faite par Newton à la théorie des ondulations était la difficulté qu'elle présente à expliquer la propagation rectiligne de la lumière, les ondes lumineuses paraissant susceptibles de faire le tour des obstacles qu'elles rencontrent; de fait, l'explication complète de ce point, qui suppose connus les phénomènes d'interférence, est moins simple que ne le supposait Huyghens. Mais de son côté Newton, pour expliquer la réflexion et la réfraction, attribuait une structure périodique à tout rayon de lumière simple avec des *accès* de plus facile *réflexion* et de plus facile *transmission* : pour rendre compte des diverses couleurs du spectre, dont l'étude expérimentale est un de ses plus beaux titres de gloire, il avait imaginé une longueur d'accès, fixe pour une couleur donnée, et variant d'une couleur à l'autre. Nous avons déjà rappelé que Descartes attribuait les diverses nuances du spectre au mouvement de rotation plus ou moins rapide des particules qui transmettent la lumière. Faisant un examen des diverses théories de l'Optique, Newton avait remarqué que, dans le système des ondu-

lations, il devait y avoir une corrélation entre l'*amplitude* des vibrations de l'éther et la *couleur* que ces vibrations font percevoir; transposé en acoustique, ceci revenait à confondre l'intensité et la hauteur d'un son. C'est Malebranche qui fit le premier l'hypothèse que la période, et non l'amplitude de la vibration, caractérise la couleur d'une lumière monochromatique. Le célèbre Oratorien, à qui l'on doit la théorie de la *Vision en Dieu*, est plus connu comme métaphysicien que comme physicien. Élu en 1699 membre honoraire de l'Académie des Sciences, il lui communiquait bientôt après ses *Réflexions sur la lumière et les couleurs, et la génération du feu*. Après avoir d'abord suivi Descartes, Malebranche s'était, après la découverte de Rømer, rallié au système d'Huyghens; mais, tandis que le grand Hollandais n'avait rien dit sur les couleurs, Malebranche concluait, je cite textuellement, que « le rayon rouge recommence ses vibrations moins souvent que ceux qui le suivent, et que le violet est celui de tous dont les vibrations sont les plus promptes ». L'honneur revient donc à Malebranche d'avoir posé d'une manière expresse l'hypothèse que la fréquence des vibrations caractérise la couleur des rayons lumineux, l'éclat de la couleur croissant avec l'amplitude de ces vibrations. De nombreuses années devaient s'écouler avant la découverte de phénomènes permettant d'évaluer cette fréquence.

Au XVIII^e siècle, la théorie des ondulations est presque entièrement abandonnée. Seul, Euler, en reste partisan. Sans les connaître, il reprend, parfois d'une manière moins heureuse, les comparaisons de Malebranche entre le son et la lumière, celle-ci étant transmise par un fluide élastique et extrêmement subtil, que l'on nomme l'*éther*. Dans ses *Lettres à une princesse d'Allemagne*, faisant la critique du système de Newton, Euler s'étonne que ce système ait été imaginé par un si grand homme et embrassé par tant de philosophes éclairés, et il ajoute : « Mais Cicéron a déjà fait la remarque qu'on ne saurait imaginer rien de si absurde, que les philosophes ne soient capables de soutenir. Pour moi, je suis trop peu philosophe pour embrasser ce sentiment. » Le grand mathématicien suisse exagère; nos idées sur le

rôle des théories sont aujourd'hui plus larges. Il n'y a rien d'absurde *a priori*, en fait de théories scientifiques; elles servent à classer et à prévoir les phénomènes, et c'est de ce point de vue qu'on doit les juger.

Les difficultés et les insuffisances de la théorie n'avaient pas empêché le développement de l'Optique. L'expérimentation faisait de grands progrès, et, dès le xvii^e siècle, des phénomènes extrêmement importants avaient été décrits. Telles, les couleurs des lames minces, dont Hooke avait commencé l'étude avant Newton, et la diffraction découverte par Grimaldi, phénomène consistant en ce que la lumière s'infléchit autour de certains obstacles. Il faut aussi mentionner l'expérience de Delisle, qui, en 1715, reconnut l'existence d'un point brillant, entouré d'anneaux, au centre de l'ombre d'un écran circulaire opaque de petite dimension. Cette expérience, qui avait été complètement oubliée, fut faite de nouveau par Poisson, au moment où la lutte était si vive entre les partisans de l'émission et ceux des ondulations. D'autre part, la construction des instruments d'optique, réflecteurs et réfracteurs, avait pris un grand essor, très favorable aux progrès de l'Astronomie.

Au début du siècle dernier, le physicien anglais Thomas Young revient à la théorie des ondulations. Young était un médecin qui s'était occupé d'abord des propriétés optiques de l'œil. Il avait fait ensuite des études philologiques, et son nom doit être cité parmi ceux qui, avant Champollion, firent d'heureuses tentatives pour déchiffrer les hiéroglyphes égyptiens. De l'assimilation de la lumière à une onde se propageant dans l'éther, analogue aux ondes sonores de l'air, Young conclut que l'on trouve alternativement, le long d'un rayon lumineux, des ventres, où il n'y a pas de changement de densité mais une vive agitation, et des nœuds où il n'y a pas de mouvement sensible mais des compressions ou des détentes. La distance entre deux nœuds consécutifs est égale à la moitié de la longueur de l'onde, et pour deux couples consécutifs de nœuds les vitesses aux points correspondants ont les mêmes valeurs absolues avec

des signes différents. Dans son Mémoire de 1801, Young pose le principe fondamental d'après lequel, si deux vibrations, provenant d'une même origine après avoir parcouru des chemins inégaux, viennent à avoir sensiblement la même direction, il y aura composition des deux mouvements. Il en résulte 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 sorte que, suivant l'expression d'Arago, de la lumière ajoutée à de la lumière peut dans des conditions convenables produire de l'obscurité : c'est ce qu'on appelle une interférence. Young le vérifiait, en faisant arriver sur deux trous étroits et voisins percés dans un écran opaque un faisceau de lumière partant d'un point. On a quelquefois attribué à Robert Hooke la découverte du principe des interférences, mais cette opinion est difficilement conciliable avec la propagation instantanée admise par ce physicien. Il semble bien, par contre, que Grimaldi observa le premier des interférences lumineuses, mais son expérience très confuse prête à de graves objections. Les belles découvertes de Young et les conséquences qu'il en tirait furent mal accueillies et, de fait, son expérience fondamentale, où intervenaient des phénomènes de diffraction, pouvait prêter à quelques critiques. C'est seulement vingt ans après qu'une expérience de Fresnel, où celui-ci faisait interférer deux rayons lumineux provenant d'un même point et réfléchis sur deux miroirs, donnait une consécration définitive au principe des interférences, et que, dans un Mémoire célèbre, le grand physicien établissait définitivement la théorie de la diffraction, expliquant aussi la propagation rectiligne de la lumière que les Newtoniens continuaient à regarder comme incompatible avec la théorie ondulatoire.

Un autre phénomène, celui de la polarisation, a joué un rôle capital dans l'histoire des théories de l'Optique. La double réfraction observée dans le spath d'Islande avait montré à Huyghens et à Newton que, dans certaines circonstances, un rayon de lumière peut se comporter de manières différentes par rapport aux plans qui passent par lui ; c'est ce qu'on exprime en disant qu'il est polarisé. Malus, en découvrant que

la polarisation peut être obtenue par réflexion, a ouvert un nouveau chapitre de l'Optique; ses travaux, ceux d'Arago, de Biot, de Fresnel, de Brewster et de bien d'autres, ont contribué de la manière la plus brillante aux progrès de la physique dans le premier tiers du siècle dernier. Cependant, malgré tant d'admirables recherches expérimentales, la théorie de l'émission et celle des ondulations restaient toujours en présence. Ici même, des savants illustres comme Laplace, Poisson et Biot continuaient à regarder le système de l'émission comme l'expression de la réalité. Les phénomènes si variés offerts par la polarisation ne semblaient pas conciliables avec le système des ondes, et dans l'autre système, on résolvait les difficultés en ajoutant une hypothèse, chaque fois qu'il fallait expliquer un fait nouveau.

Dans la théorie des ondulations, on avait jusque-là comparé le mouvement des ondes lumineuses au mouvement des ondes sonores; la vibration était supposée *longitudinale*, c'est-à-dire dans la direction du rayon lumineux. C'est à Fresnel que revient la gloire d'avoir affirmé nettement la nécessité des vibrations *transversales*, c'est-à-dire perpendiculaires au rayon. Cette idée parut d'abord une absurdité mécanique aux savants contemporains; Arago, qui avait suivi avec tant d'intérêt les travaux de Fresnel et avait même collaboré avec lui, ne put se décider à l'admettre, peut-être par crainte des objections de Laplace. Elle se présentait cependant naturellement, si l'on voulait expliquer l'impossibilité d'interférer pour deux rayons polarisés à angle droit, et rendre compte des expériences fondamentales sur la polarisation faites en commun par Fresnel et par Arago lui-même.

Il importe de se rappeler que la théorie de l'élasticité dans les milieux à trois dimensions n'était pas constituée à cette époque, et que le mémoire initial sur cette question, celui de Navier en 1821, parut en même temps que les premières études de Fresnel sur la double réfraction. Il devait être suivi des travaux considérables de Poisson, de Cauchy, de Green, de Lamé, mais on ne doit pas oublier que Fresnel a été indirectement un des fondateurs de la théorie de l'élasticité, et qu'on lui doit notamment l'introduction de la notion de corps élas-

tique anisotrope, c'est-à-dire n'ayant pas la même élasticité dans toutes les directions. Fresnel devançait quelque peu les temps, quand il faisait une distinction audacieuse entre les vibrations transversales et les vibrations longitudinales d'un corps élastique isotrope, les premières laissant invariable la densité des divers éléments du milieu, mais leur communiquant un mouvement tourbillonnaire, et les secondes ne produisant aucun mouvement de cette sorte, mais faisant varier la densité. Dans le cas le plus simple, celui du vide, il assimilait l'éther à un solide élastique incompressible, milieu dans lequel les mouvements transversaux sont les seuls auxquels on puisse appliquer la notion de propagation. Les pages restent à jamais mémorables, où Fresnel montre comment les lois de l'interférence des rayons polarisés sont des conséquences de sa manière de voir, le phénomène de la polarisation consistant, non pas à créer, mais à séparer des mouvements transversaux de direction déterminée.

Fresnel a mis sur ses bases définitives la doctrine des ondes lumineuses. Certes, on trouve dans plusieurs de ses travaux des divinations merveilleuses plutôt que des déductions rigoureuses, et il ne fit qu'ébaucher une théorie mécanique de la lumière. Les physiciens et les géomètres, successeurs immédiats du grand physicien enlevé par une mort prématurée, ont complété son œuvre et en ont tiré des conséquences nouvelles de la plus haute importance. Aujourd'hui même, malgré certaines différences d'interprétation, la fécondité de la théorie des ondes est loin d'être épuisée, et le nom de Fresnel reviendra plus d'une fois dans la suite de ce discours.

II.

Parmi les continuateurs de Fresnel, Hippolyte Fizeau brille au premier rang. Il naquit à Paris le 23 septembre 1819. Son père devint professeur à la Faculté de Médecine de Paris en 1823, lors de la réorganisation de cette Faculté et de l'expulsion de quelques-uns de ses membres. Très lié avec Laënnec, le professeur Fizeau fut un

des premiers adeptes de l'auscultation, et occupa dignement la chaire de pathologie interne. Notre confrère voulut d'abord suivre la carrière paternelle et commença ses études médicales ; mais sa santé, alors délicate, le força bientôt à les abandonner. Mis en relations avec Arago, qui vingt-cinq ans plutôt avait encouragé les débuts de Fresnel, et dont le prosélytisme ardent était habile à découvrir les vocations scientifiques, il résolut de se consacrer à la physique. Sa fortune personnelle le laissait d'ailleurs libre de suivre ses goûts, et c'est avec ses propres ressources qu'il poursuivit la plupart de ses recherches.

Les premiers travaux de Fizeau se rapportent à la photographie, qui en 1840 se réduisait au Daguerrotypé. Par l'emploi d'un sel d'or, obtenu par la réaction du chlorure d'or sur l'hyposulfite de soude, Fizeau réussit à rendre les images plus visibles et plus belles, et moins sujettes à s'effacer. L'usage du brome dans la photographie lui est également dû. Avec la couche impressionnable d'iodure d'argent, employée par Daguerre, le temps de pose était très long ; quand la couche d'iodure a d'abord été soumise à la vapeur de brome, la nouvelle couche sensible est impressionnée dans un temps cent fois plus court. Fizeau a encore indiqué, comme moyen d'accélérer la production des images, l'emploi de couches sensibles légèrement impressionnées par la lumière avant leur exposition dans la chambre noire. Vers 1840, quelques expériences avaient été interprétées comme prouvant l'existence de radiations invisibles particulières ; c'était la première apparition, semble-t-il, de ces radiations singulières, qui depuis lors ont eu des fortunes très diverses. Un physicien, du nom de Moser, avait été conduit à admettre que certains corps émettent des radiations capables d'agir sur une surface polie placée près d'eux. Fizeau, peu confiant dans ces nouveaux rayonnements, donne une explication différente, en établissant que les images ainsi produites doivent être attribuées à un transport matériel de substances volatiles accidentelles.

Pendant quelques années, Fizeau publia divers travaux en collaboration avec Léon Foucault. Celui-ci, comme Fizeau, avait commencé des études médicales ; non moins adroit manipulateur que profond

mécanicien, Foucault serait peut-être devenu un chirurgien éminent, si l'impression produite sur lui par la vue du sang ne l'avait obligé à une autre orientation. Le même intérêt pour la photographie avait rapproché les deux jeunes gens à la suite d'une consultation que Foucault avait demandée à Fizeau sur l'emploi du brome dans le Daguerreotype. Un mémoire, signé de leurs deux noms, concerne l'action des rayons rouges sur plusieurs substances impressionnables à la lumière ; ils y signalaient l'action *neutralisante* que les rayons rouges et d'autres rayons moins réfringibles encore exercent sur les couches sensibles, lorsque la lumière blanche a préalablement agi sur elles. Mais c'est dans l'étude des interférences, avec de grandes différences de marche, que la collaboration des deux jeunes physiciens fut surtout fructueuse. Les interférences n'avaient été observées jusque-là que pour des différences de marche d'un petit nombre d'ondulations. Lorsqu'on se sert de lumière blanche pour produire le 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. En analysant au spectroscopie la lumière qui traverse l'appareil interférentiel, et employant ainsi une lumière relativement simple, Fizeau et Foucault reculèrent considérablement les limites pour lesquelles on pouvait avoir des franges observables et mesurables. Ils atteignirent des différences de marches égales à sept ou huit mille longueurs d'ondes, et ils purent aussi observer les phénomènes de polarisation chromatique dans un état de simplicité remarquable avec des lames cristallisées relativement épaisses. Avec leur dispositif expérimental, il n'y a d'autre limite à la grandeur de la différence de marche que celle qui résulte du pouvoir de séparation du spectroscopie ; on sait que des progrès ultérieurs ont permis d'aller jusqu'à près d'un million de longueurs d'ondes. Il ne faut pas oublier à ce sujet que le dispositif imaginé en 1846 par Fizeau et Foucault pour obtenir un spectre très pur et très étendu constitue l'appareil spectroscopie même, avec lequel Kirchhoff devait faire trois ans plus tard ses belles découvertes sur l'analyse spectrale.

On doit encore à la collaboration des deux physiciens un travail, important pour l'époque, sur l'interférence des rayons calorifiques. On savait depuis longtemps qu'un spectre calorifique s'étend bien au delà du rouge ; il était intéressant de rechercher si, pour ce spectre, on aurait aussi des interférences. Fizeau et Foucault ont pu constater l'existence de bandes alternativement chaudes et froides dans toute son étendue, et vérifier que dans la partie visible, comprise entre le violet et le rouge, les franges de chaleur coïncident avec les franges de lumière.

En 1848, Fizeau communiquait à la Société Philomathique une courte Note intitulée : *Sur les phénomènes que présente le son lorsque le corps sonore ou l'observateur sont en mouvement, et sur les phénomènes correspondants que doit présenter la lumière*. Ces quelques pages présentent un intérêt historique considérable. Fizeau remarque que, si un corps sonore émettant un son continu et toujours identique se meut, les ondes sonores ne seront pas disposées symétriquement autour de lui, comme cela a lieu quand il est au repos ; mais elles seront plus rapprochées les unes des autres dans la région vers laquelle aura lieu le mouvement, et plus éloignées dans la région opposée. Pour un observateur placé en avant du corps sonore, le son sera plus aigu, il sera plus grave au contraire pour l'observateur placé en arrière. Fizeau ajoute : « Si l'observateur à son tour est supposé en mouvement, le corps sonore restant immobile, le résultat sera semblable ; mais la loi du phénomène est différente », et il décrit un appareil, sorte de roue de Savart où la disposition est inverse, permettant de vérifier ces curieuses propriétés du son dans le cas du mouvement d'un corps sonore. Ces considérations sont ensuite appliquées à la lumière, et Fizeau voit très nettement que le mouvement du corps lumineux ou de l'observateur aura pour effet d'altérer la longueur d'onde des rayons simples qui composent la lumière, ce qu'il exprime sous la forme suivante : « Considéré dans le spectre, cet effet se traduira par un *déplacement des raies* ⁽¹⁾, correspondant au changement de la longueur

(1) C'est Fizeau qui souligne.

d'ondulation. » En supposant le spectre formé au moyen d'un prisme de flint de 60° , il calcule les déplacements angulaires de la raie D du sodium pour diverses vitesses du corps lumineux, et termine par le souhait que ces conséquences puissent être soumises à l'observation. Quand Fizeau publiait ce travail, il ignorait que, quelques années auparavant, en 1842, un physicien de Prague, Döppler, s'était posé les mêmes questions ⁽¹⁾. Ses résultats avaient été ceux de Fizeau, en ce qui concerne la partie purement cinématique du phénomène, et aussi en ce qui concerne l'application aux ondes sonores; mais, en ce qui concerne la lumière, voici une de ses conclusions : « par l'approche de l'objet lumineux, la coloration pour une vitesse croissante passe du blanc au vert, puis au bleu et finalement au violet ». Döppler croyait d'ailleurs trouver des confirmations de sa théorie dans les variations de couleur qu'ont subies certaines étoiles et qu'il attribuait à la variation de la vitesse de ces astres. Deux ans après, en 1844, un physicien hollandais, Buys-Ballot, montrait ce qu'avaient d'inadmissible les vues de Döppler, surtout à cause de la constitution complexe de la lumière des étoiles, d'où il résulte que le mouvement amène seulement un déplacement des parties du spectre tant invisibles que visibles, ce qui ne produit aucun changement dans la coloration, tout au moins si la vitesse de l'astre n'est pas du même ordre que la vitesse de la lumière. Mais Buys-Ballot ne va pas au delà d'une critique négative, et l'honneur revient à Fizeau d'avoir appelé l'attention sur le fait capital du *déplacement des raies*, circonstance d'autant plus remarquable que l'analyse spectrale n'avait pas encore fait l'objet des travaux célèbres de Kirchhoff et Bunsen; elle étonne moins cependant quand on se rappelle les études faites en commun sur le spectre par notre confrère et par Foucault, études préparant celles des physiciens allemands.

(1) Dans une communication de 1839, intitulée : *Remarques sur quelques points de la théorie des radiations*, et insérée au tome IX des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, page 719, Biot paraît avoir fait au sujet de la lumière un raisonnement analogue à celui de Döppler, qu'il aurait ainsi devancé (voir page 725, de la ligne 9 à la ligne 15). Je dois cette remarque à M. Ch.-Ed. Guillaume.

Fizeau donne d'abord dans son Mémoire les formules relatives à l'acoustique, formules différentes suivant que la source ou l'observateur est en mouvement par rapport à l'air. Des ondes sonores, il passe aux phénomènes lumineux, confiant dans des raisonnements par analogie dont les difficultés devaient seulement apparaître plus tard, et qui conduisent d'ailleurs à des résultats exacts en première approximation; il insiste en terminant sur ce que les déplacements des raies donnés par sa théorie pourront dans certains cas être accessibles à l'observateur. Les travaux ultérieurs de Döppler, uniquement préoccupé des changements de coloration, montrent qu'il ne comprit pas le point de vue de Fizeau; mais l'histoire des sciences, bienveillante à son égard, a cependant donné le nom de Döppler-Fizeau au principe, dont les conséquences ont été si fécondes en physique et en astronomie. C'est à l'astronome anglais Huggins que revient le mérite d'avoir en 1868 fait, le premier, des applications de la méthode de Fizeau à la recherche des vitesses radiales des astres; le déplacement vers le rouge de la raie F de l'hydrogène dans *Sirius* l'a conduit à la conclusion que cette étoile s'éloigne de la Terre avec une vitesse de quarante-sept kilomètres par seconde. Depuis lors, la recherche de la vitesse radiale des astres par la méthode de Döppler-Fizeau est devenue une opération courante dans les Observatoires; deux de ses applications les plus remarquables concernant l'étude spectroscopique des étoiles doubles et la recherche des vitesses des nébuleuses, qui peuvent s'élever à dix-huit cents kilomètres par seconde.

Fizeau avait désiré une vérification expérimentale directe de son principe. Elle fut faite d'abord par Belopolsky et Galitzine, et d'une manière beaucoup plus simple en 1914 par MM. Fabry et Buisson; dans l'expérience de ces derniers le mouvement d'une source lumineuse ou d'un corps diffusant, tel qu'un disque de papier entraîné par l'arbre d'une petite machine, se traduisait par un léger changement apparent dans la longueur d'onde de la lumière, qu'ont mis en évidence les appareils interférentiels de ces physiciens. Cette expérience est même susceptible de donner une mesure de la vitesse de la lumière,

qui se trouve ainsi directement comparée à la vitesse linéaire d'un point du disque. Dans un autre ordre d'idées, on a pu aussi vérifier le principe de Döppler-Fizeau, en observant le déplacement des raies émises par les *rayons canaux*.

Mais revenons à l'année 1849. La vitesse de la lumière n'avait été déduite jusque-là que d'observations astronomiques, en supposant connue la distance du Soleil à la Terre; elle était alors évaluée à 310 000 kilomètres par seconde. On doit à Fizeau la première méthode permettant de rendre sensible et de mesurer la vitesse de la lumière entre deux stations terrestres. Il reprenait, mais sous une forme susceptible de réalisation, l'idée indiquée jadis par Galilée et par Fermat. Sa méthode, d'une ingéniosité remarquable, consiste à lancer un rayon de lumière entre les dents d'une roue dentée et à la faire réfléchir à une grande distance. Si la vitesse de rotation imprimée à la roue a une valeur convenable, la lumière au retour rencontre une dent au lieu d'un vide et se trouve arrêtée; pour une vitesse double, la lumière rencontre le vide suivant et passe de nouveau, et ainsi de suite alternativement, pour des vitesses progressivement croissantes. La précision de la détermination repose sur la mesure de la vitesse de la roue dentée aux moments des apparitions et disparitions de la lumière de retour, ou plus exactement de ses maxima et minima; la perfection de la taille des dents joue aussi un rôle important. L'expérience fut tentée par Fizeau entre la maison de son père à Suresnes, où il habitait alors, et Montmartre, la distance étant de 8^{km}, 633. Elle avait été faite principalement en vue de constater l'efficacité de la méthode; mais, quoique la valeur trouvée, environ 315 000 kilomètres, ne dût être considérée que comme une première approximation et non comme une détermination exacte, la communication de Fizeau fit grande sensation dans le monde scientifique. La Commission nommée pour l'examen de son travail conclut « en demandant l'autorisation de faire construire, aux frais de l'Académie, un appareil au moyen duquel on rendra évidente l'extrême précision des mesures, qu'on peut obtenir de cette ingénieuse méthode ».

Malheureusement la mort d'Arago et celle du constructeur Froment empêchèrent alors de répéter cette belle expérience. Ce ne fut qu'en 1874 que Cornu reprit la méthode de Fizeau, en se servant des procédés d'observation les plus précis, et en faisant une discussion minutieuse des conditions de l'expérience. Il opéra d'abord entre l'École Polytechnique et le Mont-Valérien, puis entre l'Observatoire et la Tour de Montlhéry distants d'environ 23 kilomètres. Le résultat final fut que la vitesse de la lumière dans le vide est de 300400 kilomètres par seconde. Quand la mort frappa Cornu en 1902, il se proposait de répéter l'expérience en opérant entre le Mont-Mounier, près de Nice, et la Corse. On doit remarquer que la méthode de Fizeau ne donne pas directement la durée de la propagation de lumière entre deux points déterminés, mais le temps qu'elle met à revenir en un point, après réflexion sur un miroir placé en un autre point. Pour des raisons théoriques que nous dirons plus loin, il serait extrêmement intéressant d'avoir avec une précision extrême une mesure de la vitesse de la lumière dans un sens unique, mais il ne paraît pas possible de réaliser une telle expérience.

Dix ans avant la détermination de la vitesse de la lumière par Fizeau avec sa roue dentée, Arago, cherchant à comparer les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau, avait indiqué le principe d'une autre méthode, d'ailleurs propre aussi à effectuer des mesures absolues. Il voulait, d'après ses propres expressions, décider « *si la lumière est un corps ou si elle est une ondulation* ». D'après la théorie de l'émission, telle du moins qu'elle a été interprétée par les successeurs de Newton, la lumière doit aller plus vite dans l'eau que dans l'air; c'est le contraire qui doit avoir lieu d'après le système des ondulations de Huyghens. Arago cherche à utiliser en Optique le miroir tournant dont Wheatstone s'était servi pour mesurer la vitesse apparente de propagation de la décharge d'une bouteille de Leyde le long d'un fil. Dans le dispositif proposé par Arago, la lumière émanée d'une image lumineuse formée au foyer d'une lentille rencontre le miroir tournant, et va se réfléchir sur un miroir sphérique fixe; puis elle revient sur le miroir tournant,

et retourne enfin vers le foyer. Le phénomène produit par la rotation consiste dans la déviation de l'image de retour, laquelle est pour l'œil une image permanente résultant de la succession très rapide d'images instantanées qui se superposent; la déviation correspond à l'angle dont a tourné le miroir pendant que la lumière parcourt deux fois l'espace qui le sépare du miroir fixe. On peut disposer un second miroir fixe et interposer entre celui-ci et le miroir mobile un tube plein d'eau, ce qui devra permettre de déterminer la comparaison de deux déviations de l'image, quelle est la plus grande des deux vitesses dans l'air ou dans l'eau. Tel était le programme tracé par Arago en 1838; il présentait des difficultés d'exécution considérables, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue optique, et ne fut pas alors complètement réalisé. Quand Arago voulut le reprendre, l'état de sa vue ne lui permettait pas de se livrer à de telles recherches. Dans la séance de l'Académie du 29 avril 1850, l'illustre astronome rappelait l'histoire de la question et les essais faits par Bréguet pour obtenir de grandes vitesses de rotation; il terminait sa communication par ces mots : « Les choses étaient dans cet état, lorsque M. Fizeau détermina par une expérience si ingénieuse la vitesse de la lumière dans l'atmosphère. Cette expérience n'était pas indiquée dans mon Mémoire, l'auteur avait donc le droit de la faire sans s'exposer au plus léger reproche d'indélicatesse. Quant à l'expérience de la vitesse comparative dans un liquide et dans l'air, l'auteur m'écrivait : « Je n'ai fait » encore aucun essai dans ce sens, et je ne m'en occuperai que sur votre » invitation formelle. » Cette réserve loyale ne pouvait qu'ajouter à l'estime que le caractère et les travaux de M. Fizeau m'ont inspirée, et je me suis empressé d'autoriser M. Bréguet à lui prêter un ou plusieurs de mes miroirs rotatifs. M. Foucault, dont l'Académie connaît l'esprit inventif, est venu lui-même me faire part du désir qu'il avait de soumettre à l'épreuve de l'expérience une modification qu'il voulait apporter à mes appareils. Je ne puis, dans l'état actuel de ma vue, qu'accompagner de mes vœux les expérimentateurs qui veulent suivre mes idées, et ajouter une nouvelle preuve, en faveur du

système des ondes, à celle que j'ai déduite d'un phénomène d'interférence, trop bien connu des physiciens pour que j'ai à le rappeler ici. »

Dans la séance suivante, le 6 mai 1850, deux communications, l'une signée de Foucault seul, l'autre de Fizeau et L. Bréguet, se rapportaient à l'expérience conçue par Arago. L'appareil rotatif dans le dispositif de Fizeau était un mouvement d'horlogerie, portant un petit miroir de douze millimètres de diamètre et pouvant atteindre une vitesse de quinze cents tours à la seconde; il avait été construit par L. Bréguet, qui utilisa les propriétés de l'engrenage de White. Dans l'appareil de Foucault, la partie mécanique était d'une remarquable perfection; le constructeur Froment avait construit une petite turbine à air comprimé, rendant deux sons, un son de *sirène* produit par l'échappement tangentiel de l'air, et un son d'*axe* provenant de ce que l'axe d'inertie ne coïncidait qu'approximativement avec l'axe de rotation; c'est de la période de ce dernier que Foucault déduisait la vitesse du miroir. On sait que la théorie des ondulations sortit victorieuse de l'épreuve, dont Arago avait eu la première idée: la vitesse de la lumière est moindre dans l'eau que dans l'air. Des perfectionnements ont été, depuis 1850, apportés par divers physiciens à la méthode du miroir tournant, notamment par M. Michelson. La valeur la plus probable aujourd'hui pour la vitesse de la lumière dans le vide est de 299 890 kilomètres par seconde de temps solaire moyen.

Nous venons de parler de la vitesse de la lumière. Cette notion ne présente pas de difficultés, quand il s'agit d'une radiation monochromatique. Mais les choses sont plus complexes si l'on considère une raie qui, tout en étant extrêmement étroite, n'a pas une largeur complètement négligeable, ou encore un faisceau lumineux, dont on trouble la propagation régulière, comme il arrive dans la méthode de Fizeau par suite d'interruptions momentanées. Il faut alors envisager la vitesse de propagation non d'une onde, mais d'un train d'ondes; c'est une telle vitesse que donnent la méthode de Fizeau, et aussi celle d'Arago-Fizeau-Foucault. La différence est nulle dans le vide, tous les rayon-

nements s'y propageant avec la même vitesse ; dans l'air elle est négligeable, mais elle ne l'est plus dans un liquide comme l'eau.

Après avoir mesuré la vitesse de la lumière, Fizeau voulut mesurer la vitesse d'une perturbation électrique dans un fil, ce qu'on appelait alors la vitesse de l'électricité. En 1834, Wheatstone avait cherché à faire cette mesure en évaluant avec un miroir tournant le temps séparant les étincelles de décharge entre un premier conducteur et un second, puis entre celui-ci et un troisième, d'où il croyait pouvoir déduire la vitesse de l'électricité dans le second conducteur. Le physicien anglais avait ainsi trouvé une vitesse de 460 000 kilomètres. Des recherches plus récentes, faites aux États-Unis en 1849, avaient donné une vitesse quinze fois moindre. Fizeau reprend la question l'année suivante, en s'inspirant du principe qu'il avait employé dans la mesure de la vitesse de la lumière. La méthode qu'il développe avec le concours de l'ingénieur Gounelle consiste à interrompre au même moment un courant à des intervalles de temps très rapprochés et en deux points très éloignés d'un conducteur, puis à observer sur un galvanomètre les variations produites ; celles-ci varient avec le nombre des interruptions et deviennent maxima pour un certain nombre d'interruptions et minima pour un autre. Les interruptions étaient produites par deux disques identiques montés sur le même arbre rotatif, et munis sur leur pourtour de parties alternativement conductrices et isolantes sur lesquelles passaient des ressorts. La vitesse de propagation était mise en évidence par des changements périodiques dans les déviations du galvanomètre correspondant à des vitesses de rotation de plus en plus grandes. Fizeau et Gounelle, opérant sur des lignes différentes et formées de métaux différents, trouvèrent 100 000 kilomètres comme vitesse de propagation de l'électricité dans les fils de fer, et 180 000 dans les fils de cuivre. A la vérité, la question de la propagation de l'électricité dans les fils est très complexe, et deux des conclusions de Fizeau montrent bien qu'il s'aperçut de ces difficultés ; il signale notamment que, dans des conducteurs de nature différente, les vitesses ne sont pas proportionnelles aux conduc-

tibilités électriques, et que les courants discontinus se propageant dans un conducteur éprouvent une diffusion en vertu de laquelle ils occupent un espace plus grand au point d'arrivée qu'au point de départ. Suivant les hypothèses faites dans cette question, on peut s'attendre à rencontrer des ondes d'espèces très diverses. Ainsi, quand on néglige l'effet de la self-induction dans un câble, comme l'a fait Lord Kelvin en appliquant à l'électricité les vues de Fourier sur la propagation calorifique, toute variation se fait sentir instantanément à toute distance, et il n'y a pas lieu de parler de vitesse de propagation; il y a alors en un point du fil un maximum d'action, et le temps au bout duquel ce maximum est atteint est proportionnel au carré de la distance. Au contraire, quand la self-induction n'est pas négligeable, il y a propagation par ondes avec une vitesse déterminée, mais cette onde s'étale en arrière et laisse une trace qui demeure indéfiniment; elle peut, dans les communications télégraphiques, être une source de confusion dans les signaux, et l'on se rend compte des résultats contradictoires obtenus dans la recherche de la vitesse de l'électricité. Ces distinctions, qui sont aujourd'hui très simples depuis la discussion approfondie de l'équation des télégraphistes, paraissent avoir été, en partie au moins, faites expérimentalement par Fizeau quand il remarquait l'étalement de l'onde électrique, qu'il appelle la « diffusion ».

Un autre travail de Fizeau, relatif à l'électricité, est d'un grand intérêt pratique : il donne un moyen, devenu classique, d'accroître l'énergie des phénomènes d'induction, qui se produisent dans la machine de Ruhmkorff. Fizeau dispose à cet effet, dans le socle de l'appareil, un condensateur formé de lames d'étain juxtaposées et isolées l'une de l'autre par une couche de vernis, et il fait communiquer chaque lame avec une borne de l'interrupteur. De cette manière, l'étincelle de l'interrupteur, qui prolongeait la durée de la rupture et diminuait par suite la force électromotrice induite, est très notablement diminuée. Par l'addition de ce condensateur, on augmente d'une manière considérable la longueur et la force des étincelles qui éclatent entre les extrémités du fil induit.

Les travaux de Fizeau sur l'électricité n'étaient qu'une diversion dans son œuvre, et il revenait toujours à l'optique. La théorie de l'aberration de la lumière et des phénomènes analogues soulevait la grave et difficile question des rapports entre l'éther et la matière pondérable.

Une lettre célèbre de Fresnel à Arago en 1818 traitait de l'influence du mouvement de la Terre dans quelques phénomènes optiques. Elle avait été provoquée par des expériences d'Arago sur la lumière des étoiles, par lesquelles il pensait établir que le mouvement de la Terre n'a pas d'influence sensible sur la réfraction des rayons émanant de ces astres. Comme le remarque Fresnel, si l'on admettait que notre globe imprime son mouvement à l'éther dont il est enveloppé, on concevrait aisément pourquoi le même prisme réfracte toujours la lumière de la même manière, quel que soit le côté d'où elle arrive, mais alors il lui paraît impossible d'expliquer l'aberration des étoiles dans cette hypothèse. « Je n'ai pu, écrit-il, concevoir nettement ce phénomène, qu'en supposant que l'éther passe librement au travers du globe terrestre, et que la vitesse communiquée à ce fluide subtil n'est qu'une petite partie de celle de la Terre. » Il suppose donc que les corps pondérables n'entraînent pas dans leur mouvement tout l'éther qu'ils contiennent, mais seulement l'excès de l'éther qu'ils renferment sur celui qui se trouverait dans un volume égal vide de toute matière pondérable. En admettant de plus que la quantité totale de l'éther contenue dans l'unité de volume d'un corps est proportionnelle au carré de l'indice de réfraction, la quantité d'éther entraînée se trouve proportionnelle au pouvoir réfringent. Fresnel arrive ainsi à proposer son principe célèbre de l'entraînement des ondes lumineuses par les corps réfringents en mouvement, ceux-ci communiquant aux ondes une fraction de leur vitesse propre, représentée par $1 - \frac{1}{n^2}$, en désignant par n l'indice de réfraction. Dans cette hypothèse l'éther peut être considéré comme immobile; les ondes seules sont entraînées. Le principe de Fresnel expliquait d'une manière simple le phénomène de l'aberration, envisagé non seulement dans les conditions ordinaires, mais étudié aussi en se

servant, comme l'avait proposé Boscovich au xviii^e siècle, d'une lunette remplie d'eau. On pouvait penser d'abord que, avec ce dispositif, l'angle d'aberration serait plus grand; mais il n'en est rien d'après la théorie de Fresnel, et les astronomes de Greenwich ont effectivement vérifié plus tard que le liquide placé dans la lunette n'a aucune influence. Malgré ces accords entre la théorie et l'observation, la conception de Fresnel paraissait singulière et une preuve plus directe était désirable. Elle a été fournie par Fizeau dans une expérience justement célèbre. Le mode d'observation qu'il employa consiste à produire des franges d'interférence avec deux rayons de lumière, après leur passage à travers deux tubes parallèles, dans lesquels un fluide peut s'écouler avec une grande vitesse et dans deux directions opposées. Pour une vitesse nulle, on observe un système de franges. Avec l'air en mouvement, dans une expérience où la vitesse atteignait vingt-cinq mètres, Fizeau ne trouva pas de déplacement sensible des franges d'interférence, mais avec l'eau, la vitesse étant de sept mètres, il y eut un déplacement en concordance très satisfaisante avec la formule proposée par Fresnel. Cette expérience admirable présentait de grandes difficultés d'exécution, dont la mesure de la vitesse de l'eau n'était pas une des moindres; elle reste à jamais mémorable dans l'histoire des rapports entre l'éther et la matière pondérable. « Le succès de cette expérience, disait prudemment Fizeau en terminant son beau Mémoire, me semble devoir entraîner l'adoption de l'hypothèse de Fresnel, ou du moins de la loi qu'il a trouvée pour exprimer le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps; car bien que, cette loi se trouvant véritable, cela soit une preuve très forte en faveur de l'hypothèse dont elle n'est qu'une conséquence, peut-être la conception de Fresnel paraîtra si extraordinaire et, sous quelques rapports, si difficile à admettre, que l'on exigera d'autres preuves encore et un examen approfondi de la part des géomètres, avant de l'adopter comme l'expression de la réalité des choses. » On peut appliquer ces sages paroles à maintes théories, leur accord avec l'expérience ne garantissant nullement qu'elles expriment la réalité des choses.

Près de trente-cinq ans s'écoulèrent avant que l'expérience de Fizeau ne fût reprise. Elle l'a été sur une échelle grandiose en 1886 par deux savants américains, notre associé étranger M. Michelson, et M. W. Morley. « La conclusion de notre travail, disaient en terminant ces deux physiciens, est que le résultat annoncé par Fizeau est entièrement correct, et que l'éther luminifère n'est aucunement affecté par le mouvement de la matière qu'il pénètre. » Dans la séance même de l'Académie où Cornu présentait le travail de Michelson et Morley, Joseph Bertrand rappelait toute l'importance attachée par Senarmont à l'expérience de Fizeau, et comment l'éminent minéralogiste avait traduit un jour son admiration par un dessin bien expressif : un continent, représentant la science acquise et dessiné à la manière des anciens géographes, était entouré d'une mer immense : *mare ignotum*, dans laquelle, à une grande distance de la côte, on apercevait une île isolée : *insula Fizeau*.

Entre temps, une théorie électromagnétique de Lorentz avait conduit à ajouter au terme de Fresnel donnant l'accroissement de la vitesse de propagation un terme complémentaire renfermant la dérivée de l'indice de réfraction par rapport à la longueur d'onde, qui peut d'ailleurs, semble-t-il, être aussi rattaché au fait déjà signalé que l'on opère sur un train d'ondes. Quoi qu'il en soit, l'expérience de Fizeau, reprise par Zeeman en 1915, paraît être en parfait accord avec la formule de Fresnel, complétée par Lorentz. Plus récemment, l'expérience a été reprise par M. Raman, de Calcutta, qui, comme Fizeau, obtint dans l'air un résultat négatif.

Après avoir étudié l'influence du mouvement d'un fluide sur la vitesse de propagation de la lumière, Fizeau voulut en 1860 opérer sur un corps solide comme le verre. Le mode d'observation employé pour l'air et pour l'eau ne pouvait être utilisé pour un solide, et il fallut recourir à d'autres principes. Fizeau part de ce résultat que, si un rayon de lumière polarisée vient à traverser une lame de verre inclinée, le plan de polarisation du rayon transmis subit une rotation, et que, toutes choses égales d'ailleurs, l'angle de rotation de ce plan

dépend de l'indice de réfraction du verre. Si donc cet indice vient à varier à l'intérieur du verre, la rotation subira une variation correspondante; par suite, la vitesse de la lumière dans le verre dépendant de l'indice, on peut déduire cette vitesse de la rotation du plan de polarisation. Quant à la vitesse du solide, c'est-à-dire du verre, elle est dans l'expérience réalisée par Fizeau la composante de la vitesse de translation de la Terre suivant la direction lumineuse. En changeant donc l'orientation de l'appareil, on réalise des expériences où la vitesse du solide prend diverses valeurs. Il avait d'abord paru à Fizeau que les rotations, calculées en utilisant la formule de Fresnel, s'accordaient assez bien avec les nombres déduits de l'observation. Il en serait résulté que le mouvement entraînant la Terre dans l'espace exerce une influence sur la rotation produite dans la lumière polarisée par une glace ou, pour augmenter les effets, une pile de glaces, ce qui permettrait de déceler le mouvement de la Terre par rapport à l'éther supposé immobile, conséquence singulièrement grave et en désaccord avec les idées qui ont prévalu depuis à ce sujet. En fait, cette nouvelle expérience de Fizeau est extrêmement délicate, le phénomène étant grandement influencé par les plus petits défauts d'homogénéité du verre. D'ailleurs, notre confrère indiquait lui-même la nécessité de la reprendre, ce qui, je crois, n'a jamais été fait. On n'en doit pas moins admirer la profonde ingéniosité et le remarquable talent d'expérimentateur dont il fit preuve dans ces recherches singulièrement difficiles.

Les beaux travaux de Fizeau l'avaient mis au premier rang des physiciens de cette époque, et il était nommé à l'Académie le 2 janvier 1860 en remplacement de Cagniard-Latour. Quatre ans auparavant, Fizeau avait reçu ici même un témoignage de haute estime. L'empereur Napoléon III venait de fonder un prix triennal de dix mille francs, à décerner par l'Institut dans les conditions suivantes : Chaque Académie ferait connaître la découverte ou l'ouvrage, remontant aux cinq dernières années, qu'elle jugeait digne du prix; une commission, composée de plusieurs membres de chacune de ces Compagnies exami-

nerait les titres des candidats proposés, et proposerait un nom à l'Institut, réuni en séance plénière, qui déciderait définitivement. C'est, en somme, à peu près ce que nous faisons aujourd'hui pour le prix Osiris. Les documents du temps montrent que cette sorte de récompense nationale à décerner pour la première fois excita vivement l'intérêt des milieux académiques. L'Académie des Sciences morales ne fit pas de présentation, jugeant qu'aucun des ouvrages, traitant dans les cinq dernières années des matières qui sont l'objet habituel de ses travaux, n'était digne d'une aussi haute récompense. L'Académie des Sciences avait pour candidat M. Fizeau, dont elle visait les deux expériences fondamentales sur la lumière. L'Académie des Inscriptions recommandait au choix de l'Institut MM. Botta et Place, dont les fouilles à Korsabad avaient restitué le palais de Sargon. Le choix de l'Académie des Beaux-Arts s'était porté sur M. Beulé, à qui on devait la découverte d'une porte monumentale et d'un escalier sur les pentes ouest de l'acropole d'Athènes, que l'on croyait alors de l'époque grecque, mais qui sont en réalité romains. Après des débats assez vifs, l'Académie française présentait simultanément les *Poèmes évangéliques* et les *Symphonies* de M. de Laprade, et les volumes de M. Beulé sur l'*Acropole d'Athènes* et sur le *Péloponèse*. La Commission générale de l'Institut se prononça par treize voix sur dix-neuf pour M. Fizeau, qui fut ainsi présenté à l'Assemblée générale de l'Institut. Dans celle-ci, la discussion fut longue et animée. Un astronome illustre protesta vigoureusement contre la présentation de la Commission, et eut l'imprudence de répondre à une assertion astronomique d'un de ses confrères qui défendait la candidature de M. Fizeau : « C'est là un fait qu'on ne peut affirmer que devant l'Institut tout entier ! » Un murmure universel accueillit cette répartie maladroite et, au vote, M. Fizeau recueillit 61 voix, 29 voix s'étant prononcées en faveur de M. Beulé, et 17 pour M. Botta.

Telle est la courte histoire du prix triennal, qui ne fut plus décerné par la suite. Quelques années après, il était remplacé par un prix biennal de 20 000 francs, décerné par l'Institut, sur la désignation

successive des cinq Académies, désignation sanctionnée par l'assemblée plénière. Le prix biennal fut donné pour la première fois, en 1861, à Thiers, pour son histoire *du Consulat et de l'Empire*; des économies budgétaires amenèrent sa suppression en 1895.

Dans les années qui suivirent son élection à l'Académie, Fizeau consacra plusieurs mémoires à la variation de l'indice de réfraction et à la dilatation de divers solides sous l'influence de la chaleur. Les franges d'interférence lui ont fourni l'idée d'une méthode très précise pour déterminer la dilatation des corps; la variation de température modifie l'épaisseur de la couche d'air dans laquelle se produisent ces franges, et l'on comprend que leurs déplacements puissent servir à déterminer les coefficients de dilatation. Tous les physiciens connaissent le dilatomètre de Fizeau, en platine iridié, avec sa plate-forme munie de trois vis calantes qui portent une lentille dont la face inférieure est plane. Après avoir déterminé la dilatation du trépied à l'aide de franges s'établissant entre la face inférieure de la lentille et la face supérieure d'un bloc de verre placé directement sur la plate-forme, on met le corps à étudier sous ce bloc, et l'opération recommence, d'où se déduit par différence le coefficient de dilatation du corps. C'est dans le mémoire de Fizeau sur les dilatations, que se trouve la phrase souvent citée : « On voit qu'un rayon de lumière, avec ses séries d'ondulations d'une ténuité extrême, mais parfaitement régulières, peut être considéré en quelque sorte comme un micromètre naturel de la plus grande perfection, et particulièrement propre à déterminer des longueurs extrêmement petites qui échapperaient à tout autre moyen de mesure. » En même temps que les dilatations, Fizeau étudiait les variations avec la température des indices de réfraction, et il a fait en particulier une étude très approfondie des phénomènes optiques que présente le spath d'Islande, corps pour lequel l'indice de réfraction du rayon extraordinaire augmente rapidement avec la température, tandis que l'indice du rayon ordinaire reste sensiblement constant. Fizeau insiste aussi sur ce que l'on rencontre dans les cristaux trois ordres de phénomènes

physiques bien distincts : propagation de la lumière, propagation de la chaleur, dilatation par la chaleur. A ces phénomènes se rattache la considération de certains ellipsoïdes, mais en général les axes de ces ellipsoïdes ne coïncident pas.

Dans la suite, Fizeau s'est surtout intéressé à la dilatabilité. Il avait installé sur la cheminée de son cabinet de travail son dilatomètre, qu'il chauffait avec une lampe à alcool, et, pendant plusieurs années, une de ses occupations était d'étudier la dilatabilité des corps auxquels s'appliqua sa méthode. La plupart de ses résultats sont encore classiques après plus d'un demi-siècle.

A l'époque où travaillait Fizeau, certaines données métrologiques faisaient encore défaut. En particulier, on n'avait pas établi la différence entre l'échelle des thermomètres à mercure et celle des thermomètres à gaz. D'autre part, les travaux du Bureau international des Poids et Mesures ont conduit à adopter l'échelle thermométrique fondée sur la variation de pression de l'hydrogène, et ainsi a disparu une légère incertitude dans les résultats de Fizeau. Dans ses déterminations classiques de dilatation au moyen de l'appareil Fizeau, M. Benoît put bénéficier de ces progrès; c'est au moyen de cet appareil, modifié dans quelques détails, que le savant métrologiste détermina la dilatabilité du mètre international et de ses copies, ainsi que celles du quartz, du mica, du spath, du béryl, qui sont devenus depuis lors des étalons de dilatation. En outre, les admirables études de M. Michelson sur les longueurs d'ondes des raies fines ont permis d'employer ces dernières aux déterminations faites avec le dilatomètre, et l'on a pu ainsi observer des interférences avec des différences de marche supérieures à trente millimètres. Ainsi, l'appareil de Fizeau s'est transformé facilement avec les progrès de la science, et il demeure un instrument classique dans tout laboratoire, où l'on pratique la haute métrologie. Ajoutons encore que les brillantes recherches de M. Michelson et celles de MM. Fabry et Perot sur l'évaluation du mètre en longueurs d'onde de la radiation rouge du cadmium relèvent dans leur principe des méthodes de notre illustre confrère.

Fizeau remplissait avec une grande conscience ses devoirs académiques, et il intervenait dans les questions relatives à l'Optique, qui se posaient devant l'Académie. Il suivit de très près les mesures des clichés relatifs au passage de Vénus sur le Soleil, apportant souvent des idées personnelles. Nos *Comptes rendus* renferment plusieurs rapports de lui sur les prix de physique, qui sont d'un haut intérêt. Un d'entre eux restera dans l'histoire de la Science. Le prix Bordin, en 1867, devait être décerné au savant *qui aurait exécuté ou proposé une expérience décisive, permettant de trancher définitivement la question déjà plusieurs fois étudiée de la direction des vibrations de l'éther dans les rayons polarisés*. L'auteur du Mémoire envoyé au concours proposait de faire interférer deux rayons se rencontrant à angle droit, et polarisés l'un et l'autre de la même manière, soit dans le plan formé par les deux rayons qui se croisent, soit normalement à ce plan. Si l'on admet avec Fresnel que la vibration est perpendiculaire au plan de polarisation, il pourra y avoir interférence au point de croisement dans le premier cas, ce qui n'aura pas lieu dans le second. Les conclusions sont inverses si, selon l'opinion de Neumann, les vibrations sont dans le plan de polarisation. L'idée de cette expérience, qui ne fut pas alors exécutée, fut reprise, en 1890 par M. Wiener, qui démontra que la vibration est perpendiculaire au plan de polarisation, si toutefois, comme le fit peu après remarquer Poincaré, l'impression photographique résulte de la force vive du mouvement vibratoire de l'éther. Avec le dispositif proposé par l'auteur du Mémoire récompensé, Wilhelm Zenker, physicien connu par des travaux d'optique physiologique, une difficulté provenait de la très petite dimension qu'il fallait donner à la source de lumière destinée à servir de point de départ commun aux rayons interférents, et Fizeau fait incidemment dans son Rapport une remarque capitale : « Il existe en effet, écrit-il, pour la plupart des phénomènes d'interférence, tels que les franges d'Young, celles des miroirs de Fresnel, et celles qui donnent lieu à la scintillation des étoiles d'après Arago, 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 observer les étoiles, il deviendra possible d'obtenir quelques données nouvelles sur les diamètres angulaires de ces astres. » On avait jusque-là vainement cherché à obtenir, par des mesures micrométriques, le diamètre apparent d'une étoile, celle-ci se présentant, comme on sait, dans les lunettes sous la forme d'une tache centrale de diffraction, ne pouvant conduire à l'évaluation du diamètre apparent. M. Stephan, alors Directeur de l'Observatoire de Marseille, utilisa le premier, en 1878, la suggestion profonde de Fizeau, en remarquant que, si l'on vise une étoile, dont le diamètre peut être regardé comme nul, avec une lunette pourvue du dispositif imaginé par notre confrère, les franges auront toujours lieu, et un grossissement assez fort les fera apparaître. Au contraire, si l'étoile a un diamètre sensible, à chaque direction rencontrant l'étoile 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'étoile et la distance des fentes correspondant à la disparition des franges, fait connaître le diamètre apparent de l'astre. L'observation des plus belles étoiles du ciel montra à M. Stephan qu'elles avaient un diamètre inférieur à $0''{,}15$. La théorie générale du problème soulevé par Fizeau fut élaborée d'abord par M. Michelson, et ensuite d'une façon plus complète par M. Hamy. Il était essentiel, pour l'application de la méthode, d'éloigner notablement les fentes, une distance de douze mètres étant nécessaire pour mesurer un diamètre apparent voisin de un centième de seconde. Or il s'en faut qu'aucun instrument astronomique ait une telle ouverture, le plus grand télescope du monde, celui du Mont-Wilson en Californie, ayant un miroir de $2^m{,}50$. Un artifice ingénieux de M. Michelson permet heureusement d'opérer,

comme si cette ouverture était beaucoup plus considérable, et c'est ainsi que, dans ces dernières années, ont été déterminés, dans le grand Observatoire américain, les diamètres apparents de *Bételgeuse* et d'*Arcturus*, respectivement égaux à $0'',047$ et $0'',024$; ce qui, en utilisant les parallaxes connus de ces étoiles, donne pour elles les diamètres linéaires égaux à trois cents fois et vingt-huit fois celui du Soleil, résultat bien propre à montrer l'admirable fécondité de l'optique des interférences. L'histoire de cette belle question ne devra pas oublier le nom de Fizeau, qui là encore a été un initiateur.

La plupart des travaux de Fizeau ont paru dans les *Comptes rendus* de notre Académie, sous une forme généralement très brève; quelques-uns seulement furent l'objet de Mémoires plus étendus dans les *Annales de Physique et Chimie*. Notre confrère avait en horreur tout ce qui peut sentir la réclame, et il ne s'est jamais soucié de la notoriété que ses travaux pouvaient valoir à son nom. En dehors de ses devoirs de famille, Fizeau a consacré tout son temps à la recherche scientifique. Pendant quelques années, il remplit les fonctions d'Examineur des Élèves à l'École Polytechnique, mais il donna bientôt sa démission pour permettre à un jeune physicien, qui fut plus tard membre de notre Compagnie, et à qui on doit des travaux sur l'optique d'une grande précision et d'une rare élégance, de devenir professeur à l'École.

Fizeau avait épousé une des filles d'Adrien de Jussieu; mais de bonne heure son foyer avait été brisé par le décès de sa femme, et toute sa vie en fut assombrie. Il vivait très retiré, n'ayant à Paris qu'un pied-à-terre, et habitant généralement son château de Venteuil, dans la Marne. Chaque semaine, il assistait à la séance de l'Académie et à celle du Bureau des Longitudes. Ceux, rares maintenant parmi nous, qui l'ont connu ici dans ses dernières années, peuvent se rappeler le vieillard à la forte chevelure et à la barbe épaisse, dont l'abord imposant était un peu froid. Le souci des intérêts de la Science le faisait seul sortir de sa réserve habituelle; quoique ennemi de la controverse, il devenait alors dans la discussion un contradicteur, avec lequel il fallait compter. Je me souviens d'un Comité secret

de notre Académie, où Fizeau, discutant les titres de deux candidats, parlait des *trouvailles* de l'un, et des *découvertes* de l'autre; ses sympathies n'allaient pas à l'auteur des trouvailles.

D'une critique très sévère pour lui-même, il se méfiait de certaines nouveautés, et il aimait à témoigner de son respect pour ceux qu'il appelait les anciens, c'est-à-dire pour les grands géomètres et les grands physiciens de la première moitié du siècle dernier, surtout pour Arago, qui lui avait montré tant de bienveillance à ses débuts, et pour Fresnel dont l'œuvre avait été sans cesse l'objet de ses méditations. Fizeau ne cessait de travailler, et peu de temps avant sa mort, il faisait encore une Communication de nature historique sur la constance moyenne d'éclat des principales étoiles. Une cruelle maladie l'enleva en quelques semaines à l'affection des siens et à l'estime du monde scientifique, le 18 septembre 1896.

III.

Telle fut l'œuvre scientifique d'Hippolyte Fizeau. Ses travaux d'optique lui assurent une place d'honneur dans l'histoire de la doctrine des ondes lumineuses, dont son génie expérimental sut dans des voies diverses montrer la fécondité. En même temps, son esprit philosophique s'est toujours préoccupé des rapports avec les corps pondérables du fluide mystérieux dont les vibrations produisent la lumière, et ce fut là l'origine de ses plus beaux travaux. A l'époque de la grande activité scientifique de Fizeau, personne ne doutait de la réalité de l'éther. Écoutons Lamé dans ses *Leçons sur la théorie mathématique des corps solides* : « L'existence du fluide éthéré, écrit-il, est incontestablement démontrée par la propagation de la lumière dans les espaces planétaires, par l'explication si simple et si complète des phénomènes de la réfraction, et les lois de la double réfraction prouvent avec non moins de certitude que l'éther existe dans tous les milieux diaphanes. Ainsi la matière pondérable n'est pas la seule dans l'Univers; ses particules nagent en quelque sorte dans un milieu fluide », et, plus loin :

« On n'en saurait douter, l'intervention de l'éther sagement conduite trouvera le secret ou la véritable cause des effets qu'on attribue au calorique, à l'électricité, au magnétisme, à l'attraction universelle, à la cohésion, aux affinités chimiques, car tous ces êtres mystérieux et incompréhensibles ne sont au fond que des hypothèses de coordination, utiles sans doute à notre ignorance actuelle, mais que les progrès de la véritable science finiront par détrôner. » Lord Kelvin proclamait aussi : « L'éther n'est pas une création imaginaire du philosophe spéculatif; il nous est aussi essentiel que l'air que nous respirons. . . . L'étude de cette substance qui pénètre tout est peut-être la tâche la plus captivante et la plus importante de la physique. »

Ainsi, les plus éminents physiciens n'avaient aucun doute sur l'existence de l'éther; à la vérité, des difficultés se sont présentées, quand on a cherché à rendre compte de sa nature, en faisant des comparaisons avec les milieux qui nous sont familiers, et en expliquant ainsi l'invisible par le visible. Il paraît nécessaire d'attribuer à l'éther une densité très faible, pour qu'il n'oppose qu'une résistance insensible au mouvement des corps célestes. Sans sortir de la catégorie des faits calorifiques ou optiques, notre confrère M. Boussinesq, analysant le faible échauffement d'une plaque métallique exposée au Soleil pendant quelques secondes, la face exposée aux radiations calorifiques étant recouverte de noir de fumée et l'autre étant polie, croit pouvoir en conclure que la densité de l'éther comparée à celle d'un métal, n'en atteint pas la fraction exprimée par une unité décimale du *douzième* ordre. De son côté, Lord Kelvin, utilisant la valeur probable du rayonnement solaire à la limite extérieure de l'atmosphère, en déduit que le rapport de la densité de l'éther à celle de l'eau est compris entre une unité décimale du vingtième ordre et une du quinzième. Mais, propriété au premier abord contradictoire, l'éther transmet, comme nous avons eu plusieurs fois l'occasion de le rappeler, des vibrations à la manière d'un solide élastique. Cette contradiction peut s'expliquer, d'après Lord Kelvin et M. Boussinesq qui se rencontrent encore ici, par la lenteur relative du

mouvement des corps célestes permettant à l'éther de conserver sa parité de constitution en tous sens et par suite les propriétés des fluides, tandis que la fluidité s'efface pour faire place à l'élasticité devant la très grande vitesse des vibrations lumineuses. Pour avoir une image de l'éther, Thomson le comparait à la poix écossaise des cordonniers; taillée, cette matière peut vibrer, mais, abandonnée à elle-même, elle s'écrase sous son propre poids. M. Boussinesq prend, comme objet de comparaison, un amas de laine non pressée, composée de nombreux filaments, s'entre-croisant dans tous les sens. Chaque couche d'un tel amas résiste notablement au glissement sur elle des couches voisines parallèles, tandis que de médiocres rapprochements ou écartement des couches n'y produisent que des résistances insignifiantes.

L'éther est, de plus, regardé comme impondérable, c'est-à-dire que ses molécules sont simplement sensibles aux actions des molécules (de matière ou d'éther) extrêmement voisines, mais que le coefficient d'attraction newtonienne est nul pour elles (1).

Telles furent les opinions généralement admises par les physiciens et les géomètres, à qui est due la théorie mécanique de la lumière. Il n'a pas été possible d'édifier une théorie mathématique, sans faire beaucoup d'autres hypothèses sur la constitution de l'éther et ses rapports avec la matière pondérable. Déjà, dans l'éther libre, pour arriver aux équations différentielles classiques de la propagation des ondes, il faut admettre que les distances des molécules d'éther se réduisent à des fractions extrêmement petites d'une longueur d'onde lumineuse, et aussi qu'il en est de même pour les distances auxquelles s'exercent leurs actions. L'étude de la dispersion de la lumière à travers la matière, mise en évidence par le prisme, présente des points très

(1) Nous avons parlé plus haut de l'excessive petitesse de la densité de l'éther. Je dois dire qu'un savant physicien anglais, Sir Olivier Lodge, ne partage pas sur ce point l'opinion commune. Il pense au contraire que cette densité est plusieurs millions de fois plus grande que celle du platine; la matière n'est nullement gênée par l'éther dans son mouvement, à cause de son excessive porosité.

déliés. On y est généralement conduit à supposer que l'intervalle des molécules de la matière pondérable et le rayon d'activité de leurs actions moléculaires sont de l'ordre de grandeur d'une longueur d'onde; des dérivées d'ordre supérieur s'introduisent ainsi dans les équations, ce qui permet d'expliquer la variabilité de la vitesse de propagation avec la longueur d'onde. Les équations sont d'ailleurs réduites à la forme linéaire, comme dans tant de questions de physique mathématique, où les difficultés analytiques seraient inextricables sans cette simplification.

Il est bien remarquable que la théorie mécanique, édiée sur cet ensemble d'hypothèses, explique un nombre immense de faits relatifs aux interférences, à la polarisation et à la dispersion de la lumière, et en fasse prévoir de nouveaux. Même l'accord a été très satisfaisant entre la théorie et l'expérience dans les questions concernant l'entraînement des ondes par les corps en mouvement, en supposant, comme Fresnel et Fizeau, l'éther sensiblement fixe, et négligeant les puissances supérieures à la première du rapport entre la vitesse du corps et la vitesse de la lumière, que l'on désigne sous le nom d'aberration. Ainsi, en particulier, il résultait de la théorie mécanique, comme de l'observation, que les phénomènes optiques se produisant à la surface de la Terre ne peuvent mettre en évidence le mouvement de translation de celle-ci, tout au moins si les termes de l'ordre du carré de l'aberration sont négligeables, c'est-à-dire si l'approximation relative n'est pas susceptible d'atteindre le cent-millionième. Tel était l'état de la question quand une expérience de M. Michelson, constamment citée dans ses dernières années, vint accuser un désaccord avec la théorie classique de l'éther. On fut généralement d'avis que, d'après celle-ci, le mouvement de la Terre devait se traduire par un terme de l'ordre du carré de l'aberration, terme que la précision de l'observation, basée sur un déplacement de franges d'interférence, pouvait mettre en évidence. Or le résultat de l'expérience de M. Michelson fut négatif, et ce fut le début de la crise de l'éther luminifère. Peut-être oubliait-on trop vite que, dans

un problème de cette nature, la théorie mécanique de l'éther, telle qu'elle est actuellement constituée, ne peut, de l'avis de bons juges comme M. Boussinesq, aller au delà des termes du premier ordre.

J'ai indiqué plus haut les principales hypothèses sur lesquelles la théorie fut édifiée, parmi lesquelles figure la forme linéaire des équations différentielles. Si grandes que pussent être les difficultés que l'on devait rencontrer en cherchant à approfondir davantage la théorie élastique de la lumière, l'effort des géomètres et des physiciens se serait sans doute tourné encore de ce côté, si une autre interprétation des phénomènes lumineux n'avait amené, depuis quelque temps déjà, un changement de point de vue chez la plupart des théoriciens de la physique. Avant d'en esquisser le développement, je dois cependant mentionner encore qu'une autre théorie de l'éther a été proposée, il y a longtemps, par Stokes, 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 y a un certain glissement qui ne peut être évité, mais la vitesse relative de l'éther par rapport à la Terre est très petite, si la condensation est suffisamment grande. La complication de la théorie, reprise par M. Planck, n'a pas permis de continuer dans cette voie, qui reste cependant ouverte.

Il faut aussi rappeler, dans l'ordre des faits positifs, une très remarquable expérience de M. Sagnac, où dans un interféromètre convenablement disposé et placé sur un plateau tournant autour d'un axe, l'effet de ce mouvement, qui est d'ailleurs du premier ordre, se traduit par un déplacement des franges d'interférence. L'auteur considère qu'il met ainsi en évidence l'action du *vent d'éther* sur le système entraîné.

La lumière et l'électricité ont été longtemps deux domaines entièrement distincts. Le physicien anglais Maxwell a réussi à établir un rapprochement entre ces deux régions de la science. Étudiant d'abord le problème électromagnétique, il suppose que les isolants ou diélectriques sont pénétrés par un fluide d'une nature particulière. En chacun de ses points, il envisage la force électrique et la force magné-

tique. Introduisant la notion de courant de déplacement dans un diélectrique, il admet que ce courant produit les mêmes effets magnétiques qu'un courant circulant dans un conducteur. A l'aide des lois connues de l'électricité et du magnétisme, il établit alors pour les diélectriques des équations fondamentales entre les forces électriques et magnétiques. Maxwell est ainsi conduit par sa théorie à l'idée d'une onde électromagnétique se propageant avec la vitesse de la lumière, et cette vue géniale a conservé un caractère hypothétique jusqu'à ce que le physicien allemand Hertz ait réalisé en 1888 ses expériences mémorables sur la propagation des ondes qui portent aujourd'hui son nom. 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 célèbre théorie électromagnétique de la lumière, en regardant une onde lumineuse comme produite par une suite de courants alternatifs, changeant de sens un nombre immense de fois par seconde ; il ne s'est d'ailleurs pas préoccupé du procédé par lequel peut être entretenue dans un corps lumineux cette perturbation magnétique excessivement rapide.

Au lieu d'une théorie élastique, nous avons maintenant une théorie électromagnétique dans un éther, dont Maxwell ne considérait pas l'existence comme moins certaine que Fresnel et Lamé. Des relations simples existent d'ailleurs entre les grandeurs correspondant aux deux théories. Ainsi, dans tout diélectrique la force magnétique et le déplacement sont dans le plan de l'onde. La force électrique est liée d'une manière simple au déplacement, mais leurs directions ne coïncident que dans le cas des corps isotropes ; pour ceux-ci, la vitesse de la molécule éthérée de Fresnel a la direction même de la force électrique, et la transposition entre les deux points de vue est particulièrement facile.

La différence était grande cependant entre l'éther de Fresnel et le fluide inducteur de Maxwell. Avec le premier, on croyait avoir affaire à une substance ressemblant plus ou moins aux corps que nous manions, et l'on avait une représentation imagée des phénomènes.

Il en était autrement avec le second, mais il faut reconnaître que la force électrique et la force magnétique, figurant dans les équations de Maxwell, sont des grandeurs directement mesurables. D'ailleurs Maxwell voulut, lui aussi, établir des analogies élastiques, et il chercha à expliquer les effets du fluide inducteur par des tensions ou compressions s'exerçant dans les diélectriques ou sur les conducteurs, tant est naturelle à l'esprit humain la tendance à expliquer l'inconnu par les phénomènes usuels qu'il regarde comme connus.

Le rapprochement réalisé par le grand physicien anglais entre la lumière et l'électricité était assurément bien captivant, et le chapitre des ondulations de l'éther 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 la théorie ondulatoire. Au contraire, après quelques incertitudes sur le mode d'existence du fluide électrique, l'atome d'électricité négative ou *électron* est devenu une réalité pour les physiciens modernes, et M. Lorentz a complété les équations de Maxwell par l'introduction de termes, où figurent, avec les forces électrique et magnétique, la vitesse et la densité des masses électriques en mouvement. Avec l'éther de Maxwell et Lorentz et les électrons qui s'y meuvent, les doctrines d'émission et d'ondulation se superposent en quelque sorte, et il est curieux de constater que le même mélange, sous de tout autres points de vue, avait été fait par Newton, au moins à ses débuts.

Le problème d'expliquer avec la théorie de Maxwell-Lorentz l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre par rapport au fluide inducteur immobile au moyen d'une expérience faite à sa surface, se posait, comme elle s'était posée pour l'éther élastique de Fresnel. Or dans ce dernier cas, nous l'avons dit, la théorie mécanique ne peut, pour ces questions d'entraînement, prétendre aller au delà des termes du premier ordre, et il y a dans ces conditions accord avec l'expérience. On estime au contraire que les équations de Lorentz expriment rigoureusement les phénomènes. Or ces équations possèdent une propriété analytique extrêmement

remarquable : elles ne changent pas quand on effectue sur *les coordonnées et le temps* des transformations linéaires formant ce que les mathématiciens appellent un groupe, et qu'on transforme en même temps d'une manière convenable les composantes des forces électrique et magnétique et la densité électrique. Le changement simultané des *longueurs* et du *temps* transforme le système en un autre, où les lois des phénomènes électromagnétiques sont les mêmes, puisque les équations exprimant ces lois n'ont pas changé. On considère que le groupe des transformations de Lorentz correspond essentiellement à des mouvements de translation uniforme du système; peut-être y a-t-il là une certaine confusion de langage et la chose n'est-elle pas aussi simple qu'on le suppose communément. Quoiqu'il en soit, on conclut qu'aucune expérience électromagnétique (en particulier optique) effectuée à la surface de la Terre ne peut mettre en évidence le vent d'éther qui devrait résulter du mouvement de translation de notre planète, et que celui-ci n'a pas d'influence sur la vitesse de la lumière. On souhaiterait de pouvoir vérifier directement ce dernier point en mesurant, avec la méthode de Fizeau par exemple, la vitesse de la lumière dans diverses directions, mais il paraît actuellement impossible d'obtenir des temps de parcours lumineux avec une approximation correspondant au carré de l'aberration; rappelons-nous de plus qu'on ne mesure pas directement la vitesse nécessaire pour aller d'un point à un autre, mais celle qui correspond à un aller et à un retour.

L'invariance des équations de M. Lorentz a eu des conséquences considérables. On peut dire qu'elle a été l'origine de la théorie de la relativité. L'illustre physicien hollandais fut d'abord conduit à une hypothèse curieuse permettant de rendre compte du résultat négatif de l'expérience de Michelson et de quelques autres analogues répondant à une approximation du second ordre : c'est qu'un corps animé d'un mouvement de translation uniforme se contracte, suivant une certaine loi, dans le sens du mouvement. Il nous serait d'ailleurs impossible de constater cette contraction, car toutes nos règles se con-

traçeraient en même temps. De plus les formules de transformation indiquées plus haut montrent que dans le système en mouvement le temps n'est pas le même que dans l'éther au repos; c'est ce que M. Lorentz appelait le temps *local*. Tout cela est sans doute fort abstrait; mais il n'en peut être autrement, toute cette théorie, quelque forme qu'on lui donne, traduisant les propriétés analytiques des équations de Maxwell-Lorentz. L'éther ou fluide inducteur de Lorentz est immobile et sans aucune propriété mécanique; il est le siège de champs électromagnétiques, et la matière, qui seule se meut, n'exerce une action électromagnétique que par les charges électriques qu'elle porte. Telle est la nature de l'éther auquel conduit la théorie électromagnétique de la lumière, éther différant essentiellement de celui de Fresnel et des mécaniciens qui l'ont suivi. Le fluide inducteur n'est plus une substance, et c'est par métaphore que nous parlons d'onde électromagnétique ou hertzienne.

En partant des résultats précédents, M. Einstein a édifié sa théorie de la relativité restreinte où il donne une autre interprétation des formules de M. Lorentz. Ici encore, on fait abstraction des difficultés que présente la notion de translation, et l'on regarde qu'une transformation de Lorentz correspond à un mouvement uniforme de cette nature. On attribue à la lumière un rôle unique et privilégié parmi les autres phénomènes physiques, d'où résulte l'emploi des signaux lumineux pour les mesures des longueurs et du temps. L'observateur entraîné dans chaque système prend pour unité de longueur une longueur relative à un phénomène physique de nature périodique, produit dans le système, par exemple la longueur d'onde d'une radiation déterminée émise par une source rattachée au système, et pour unité de temps la période correspondante. On compare au moyen des formules de transformation de Lorentz les longueurs et les temps de deux systèmes animés l'un par rapport à l'autre d'un mouvement uniforme de translation. Dans cette doctrine, il n'y a pas d'un côté un espace à trois dimensions et d'un autre côté un temps, mais un continuum à quatre dimensions; les phénomènes se passent dans ce continuum qui

est l'*Univers*. Guidé par des analogies géométriques et l'ordre d'idées se rattachant au principe de la moindre action dans la mécanique classique, on pose qu'un mobile *libre* décrit une géodésique de cet Univers, et les rayons lumineux sont des géodésiques de longueur nulle. Cet énoncé dit assez le degré d'abstraction de la doctrine relativiste, et il n'en peut être autrement, un continuum à plus de trois dimensions n'étant pas susceptible d'une représentation intuitive. Que deviennent l'éther de Fresnel et le fluide inducteur de Maxwell? Ils doivent nécessairement disparaître avec l'espace et le temps absolus. Il ne peut y avoir de place ici pour un milieu immobile à trois dimensions, puisqu'il n'y a plus d'indépendance entre le temps et l'espace.

On a beaucoup écrit sur la relativité restreinte, et les personnes les moins habituées aux choses de la science en ont disserté savamment. Pour quelques-uns les idées relativistes sont imposées par l'expérience. C'est oublier qu'aucune théorie ne présente un tel caractère de nécessité; d'ailleurs certaines hypothèses qui y sont faites sur la lumière débordent le point de vue initial. Mais, quoi qu'on puisse penser du fond même de la doctrine, il faut reconnaître qu'elle s'est bien adaptée à certains phénomènes, et une application intéressante de la cinématique relativiste a été faite, qui nous ramène à Fizeau. Cette cinématique est différente de la cinématique classique, pour laquelle la loi de composition de deux vitesses s'exprime par leur somme. Cette loi est plus compliquée dans la théorie de la relativité, et, si on l'applique à la recherche de la vitesse de la lumière dans un liquide en mouvement, on obtient le terme de Fresnel correspondant au transport partiel de l'éther, que Fizeau a retrouvé dans sa célèbre expérience. La même formule de composition permet aussi de donner une théorie complète de l'aberration de la lumière. Quant à la dynamique relativiste du point, où la masse dépend de la vitesse, elle a été fondée, avant la lettre en quelque sorte, par Lorentz dans ses belles études sur la dynamique de l'électron; elle conduit à des résultats en accord avec les expériences faites sur les mouvements à grande vitesse dans les tubes à vide.

Il était naturel que des discussions, où intervenait la notion du temps, prissent un caractère philosophique. Dès l'Antiquité, les problèmes que soulève la nature du Temps ont fait l'objet de longues discussions, et elles n'ont pas cessé durant le Moyen Age et les temps modernes. Saint Augustin, dans ses *Confessions*, raconte ses angoisses, quand, cherchant à expliquer ce qu'est le Temps, il adressait à Dieu d'ardentes supplications pour obtenir des lumières sur une question qui le troublait profondément. Pascal, se défiant de la spéculation philosophique *a priori*, jugeait inutile et impossible de définir le Temps. « Pourquoi entreprendre de le définir, lit-on dans les *Pensées*, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant du Temps, sans qu'on le désigne davantage. » On a cherché à expliquer le Temps par l'idée de Succession. Ainsi Leibnitz le regardait comme *un ordre de Successions*, et Laplace de son côté écrivait au début de son *Exposition du Système du Monde* : « Le Temps est pour nous l'impression que laisse dans la mémoire une suite d'événements dont nous sommes certains que l'existence a été successive. » Cette phrase, où le grand géomètre considère qu'il n'est pas de Temps sans conscience, semble le rapprocher de M. Bergson, qui a longuement analysé le Temps psychologique, Temps réellement perçu et vécu, qui, toujours le même, est le Temps du sens commun. Au sujet de ce Temps, l'éminent philosophe a insisté, dans sa belle étude, *Durée et simultanéité*, sur ce que les sciences mathématiques et physiques s'intéressent à la mesure des choses et non pas à leur nature, et peut-être cette distinction a-t-elle été trop souvent oubliée dans le développement des paradoxes, qui ont valu tant de popularité à la doctrine de la relativité restreinte. Pour M. Bergson, vieillissement et durée appartiennent à l'ordre de la qualité, et aucun effort d'analyse ne les résoudra en quantité pure, la chose restant ici distincte de sa mesure. Il conclut que les Temps de la relativité restreinte, un seul d'entre eux excepté, sont des Temps sans durée, où des événements ne sauraient se succéder, ni des choses subsister, ni des êtres vieillir. Ainsi se trouveraient réconciliés le sens commun et la nouvelle doctrine.

La forme, sous laquelle M. Einstein a exprimé les propriétés analytiques des équations de l'électromagnétisme, l'a conduit à des généralisations qui ont modifié considérablement les points de vue de la relativité restreinte. L'idée essentielle est qu'*un Univers* est une multiplicité à quatre dimensions, et que ses propriétés dépendent des coefficients d'une forme quadratique de différentielles des quatre coordonnées correspondant à un événement. On pose en principe que toute loi physique doit être exprimée par des relations gardant par rapport à cette forme quadratique un caractère invariant, quand on effectue sur les coordonnées une transformation quelconque, *ce qui constitue de la façon la plus générale le principe de relativité*. Le résultat essentiel de M. Einstein consiste dans la découverte d'une forme quadratique se rapportant à un champ ponctuel de gravitation; l'attraction est ainsi ramenée à être non plus une force mais une propriété de l'espace. On demandera ce que devient le rayon lumineux dans cette physique nouvelle; pour répondre, il faudrait parler des géodésiques de longueur nulle correspondant à une forme quadratique fondamentale. Il semble presque oiseux de parler de l'éther au milieu de ces abstractions.

L'éther, nous l'avons vu, avait été sacrifié dans la relativité restreinte, mais il semble que, dans la relativité généralisée, on tienne aujourd'hui à conserver le mot. Il ne paraît pas possible de regarder comme homogène et isotrope l'espace vide dont l'état est représenté par les dix coefficients de la forme quadratique. « L'éther de la théorie générale de la relativité, écrit M. Einstein, est un milieu privé de toutes les propriétés mécaniques et cinématiques, mais qui détermine les phénomènes mécaniques et électromagnétiques », et il conclut de la manière suivante : « Cet éther ne doit pas être conçu comme étant doué de la propriété qui caractérise les milieux pondérables, c'est-à-dire comme constitué de parties pouvant être suivies dans le temps : la notion de mouvement ne doit pas lui être appliquée. » En fait, dans une physique, qui se trouve ramenée à la géométrie, et où l'on s'efforce de tout expliquer par les propriétés d'un espace à quatre dimensions, il

semble que l'éther ne puisse être autre chose que cet espace lui-même, tout au moins quand il s'agit du champ gravitationnel. Est-il alors bien nécessaire de conserver un mot pouvant prêter à d'étranges confusions? La question se complique encore, si l'on envisage un Univers où il y ait à la fois un champ de gravitation et un champ électromagnétique; la synthèse qui doit les rapprocher ne semble pas encore faite.

Il est, je crois, impossible actuellement, malgré quelques succès, de prévoir l'avenir de la théorie de la relativité. A lire certains auteurs, on pourrait penser qu'une dynamique de la relativité est dès aujourd'hui fondée. C'est aller un peu vite, car une mécanique générale de la relativité n'est pas fondée, tant qu'on se borne au mouvement d'un seul point. Or, quand on veut essayer de constituer une mécanique relativiste des systèmes, on se heurte à beaucoup d'arbitraire, et l'on peut se demander si la confrontation de l'expérience et de l'observation avec les résultats d'une théorie présentant une telle indétermination offrira un bien grand intérêt. On sait à quelles discussions a donné lieu l'examen de quelques cas très particuliers, concernant un seul point. Que sera-ce pour un système? Il est donc permis de rester dans une prudente expectative. Le système des ondulations n'a-t-il pas mis jadis cent cinquante ans à triompher?

Le résultat, regardé généralement comme le plus net, à l'actif de la théorie de la relativité est le phénomène observé, dans une éclipse récente de Soleil, de la déviation de la lumière venant d'une étoile sous l'action du Soleil (1). L'attraction de la lumière par la matière est un phénomène du plus haut intérêt, mais peut-être ne sera-t-il définitivement admis que quand il aura été mis en évidence par une expérience à la surface de la Terre. Aux noms de Rømer et de Fizeau se rattache la mesure de la vitesse finie de la lumière, le premier ayant déduit cette mesure d'observations astronomiques, le second ayant opéré à la surface de la Terre. Souhaitons que la déviation prévue par Einstein

(1) Une discussion très serrée faite récemment par M. Esclangon des clichés photographiques l'a conduit à la conclusion que les observations ne confirment ni n'infirmement la loi de déviation d'Einstein.

trouve bientôt son Fizeau, et ce phénomène, sinon son explication, ne pourront plus être mis en doute.

Il apparaîtra peut-être, d'après ce qui précède, que les opinions des physiciens sur l'éther et sur la lumière sont quelque peu incertaines. Nous pourrions facilement augmenter encore la confusion du tableau, en parlant d'une direction dans laquelle tendent à s'engager quelques parties de la physique. Malgré le vieil adage : *Natura non facit saltus*, la discontinuité s'introduit de plus en plus dans les théories scientifiques, et il semble que, pour certains phénomènes au moins, l'énergie soit émise ou absorbée par sauts : c'est la doctrine des *quanta*. Les faits, qui ont conduit à cette hypothèse, se sont présentés dans l'étude du rayonnement des corps noirs, modifiant encore nos idées sur les relations entre l'éther et la matière. Peut-être allons-nous bientôt assister au développement de la théorie des *quanta de lumière*, où l'on attribuera une structure granulaire à la lumière, revenant ainsi à une sorte d'émission. Les théories de la physique et de la physico-chimie traversent en ce moment une crise, qui promet d'être singulièrement féconde. Les mathématiciens peuvent se réjouir du rôle considérable que joue l'instrument mathématique dans le développement des idées nouvelles. On regarde de plus en plus aujourd'hui qu'une théorie ne doit pas avoir la prétention de donner des apparences une explication conforme à la réalité, et que sa partie essentielle est le moule analytique dans lequel elle cherche à enfermer les choses.

Après ce travail d'analyse, ce sont surtout des résultats expérimentaux nouveaux et très nets que nous devons souhaiter; quelques faits prévus et expliqués par une théorie ne suffisent pas à la fonder, alors que d'anciens points de vue en ont expliqué et prévu tant d'autres qu'elle laisse de côté. Puissent les doctrines récentes susciter des expérimentateurs de génie, comme l'a fait au siècle dernier l'admirable théorie des ondes lumineuses, dont l'œuvre du grand physicien, que j'ai essayé de faire revivre devant vous, m'a conduit à rappeler sommairement l'histoire.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES

D'HIPPOLYTE FIZEAU.

Image photographique sur métal fixée par un procédé qui n'altère ni la pureté ni la vigueur du dessin (*C. R. Ac. Sciences*, t. 10, 1840, p. 488).

Procédé pour la fixation des images photogéniques (*Ibid.*, t. 11, 1840, p. 237, 906).

Contre-épreuve en cuivre d'une image photographique, obtenue au moyen des procédés galvanoplastiques, sans altération de l'image originale (*Ibid.*, t. 12, 1841, p. 401).

Contre-épreuve métallique du premier moule formé sur l'image daguerrienne (*Ibid.*, t. 12, 1841, p. 509, 957).

Emploi du brome dans la photographie sur plaques métalliques (*Ibid.*, t. 12, 1841, p. 1189).

Dépose le pli cacheté n° 271, le 16 août 1841 (*Ibid.*, t. 13, 1841, p. 388).

Note sur l'emploi du brome dans la photographie sur plaque (*Bibl. Univ.*, t. 34, 1841, p. 181; *Ann. Elect.*, t. 7, 1841, p. 224).

Sur les causes qui concourent à la production des images de Möser (*C. R. Ac. Sciences*, t. 15, 1842, p. 896; t. 16, 1843, p. 397; *Annales de Chimie*, t. 7, 1843, p. 240; *Bibl. Univ.*, t. 43, 1843, p. 395; *Poggend. Ann.*, t. 58, 1843, p. 592).

Met sous les yeux de l'Académie des épreuves obtenues sur une plaque daguerrienne attaquée par des acides au moyen d'un procédé particulier qui permet d'obtenir des blancs purs (*C. R. Ac. Sciences*, t. 16, 1843, p. 408).

Sur les effets résultant de certains procédés employés pour abréger le temps nécessaire à la formation des images photographiques (*C. R. Ac. Sciences*, t. 16, 1843, p. 759; *Poggend. Ann.*, t. 59, 1842, p. 161).

Dépose le pli cacheté n° 431 le 4 septembre 1843 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 17, 1843, p. 485).

Recherches sur l'intensité de la lumière émise par le charbon dans l'expérience de Davy (en collaboration avec L. Foucault) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 18, 1844, p. 746, 860; *Archives de l'Electricité*, t. 4, p. 311).

Note sur un procédé de gravure photographique (*C. R. Ac. Sciences*, t. 19, 1844, p. 119).

Note sur un procédé de gravure photographique (*Archives de l'Electricité*, t. 6, 1844, p. 499).

Recherches sur l'intensité de la lumière émise par le charbon dans l'expérience de Davy (en collaboration avec L. Foucault) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 18, 1844, p. 746; *Annales de Chimie*, t. 11, 1844, p. 370; *Archives de l'Electricité*, t. 4, 1844, p. 311; *Poggend. Ann.*, t. 63, 1844, p. 463).

Dépose avec L. Foucault un pli cacheté n° 525, le 9 décembre 1844 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 19, 1844, p. 1322) (pli ouvert, sur leur demande, le 5 octobre 1846).

Sur le phénomène des interférences entre deux rayons de lumière dans le cas de grandes différences de marche (en collaboration avec L. Foucault) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 21, 1845, p. 1155; *Annales de Chimie*, t. 26, 1849, p. 138; *Poggend. Ann.*, t. 72, 1848, p. 355).

Note sur l'intensité de la lumière de la pile comparée à la lumière solaire (*Bull. Soc. Energ.*, t. 44, 1845, p. 393).

Sur la polarisation chromatique produite par les lames épaisses cristallisées (en collaboration avec L. Foucault) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 22, 1846, p. 422).

Dépose avec L. Foucault le pli cacheté n° 635, le 4 mai 1846 (*Ibid.*, t. 22, 1846, p. 747).

Mémoire sur le phénomène des interférences entre deux rayons de lumière dans le cas de grandes différences de marche et sur la polarisation chromatique produite par les lames épaisses cristallisées (en collaboration avec L. Foucault) (*Annales de Chimie*, t. 30, p. 146).

L'action des rayons rouges sur les plaques daguerriennes (en collaboration avec L. Foucault) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 23, 1846, p. 679).

Recherches sur les interférences des rayons calorifiques (en collaboration avec L. Foucault) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 25, 1847, p. 447 et 485; *Procès-verbaux Soc. Philom. Paris*, 1847, p. 6; *Poggend. Ann.*, t. 73, 1848, p. 462).

Longueurs d'ondes des rayons calorifiques (*Procès-verbaux Soc. Philom. Paris*, 1847, p. 108).

Rapport sur deux Mémoires de MM. Fizeau et Foucault, relatifs à l'observation des interférences dans le cas de grandes différences de marche entre les rayons interférents et à plusieurs applications de ces procédés d'observation. Premier Mémoire, 24 novembre 1845; — Deuxième Mémoire, 9 mars 1846 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 26, 1848, p. 680).

Particularités que présente le son lorsque le corps sonore ou l'observateur sont animés d'un mouvement de translation rapide (*Procès-verbaux Soc. Philom. Paris*, 1848, p. 81).

Dépose le pli cacheté n° 878, le 22 janvier 1849 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 28, 1849, p. 140).

Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière (*C. R. Ac. Sciences*, t. 29, p. 90 et 132; *Poggend. Ann.*, t. 79, 1850, p. 167; *Revue scient.*, t. 5, 1849, p. 393).

Dépose avec E. Gounelle le pli cacheté n° 949, le 3 septembre 1849 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 29, 1849, p. 271).

Recherches sur la vitesse de propagation de l'électricité (en collaboration avec E. Gounelle) (*Ibid.*, t. 30, 1850, p. 150, 287).

Notes sur l'expérience relative à la vitesse comparative de la lumière dans l'air et dans l'eau (en collaboration avec L. Bréguet) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 30, 1850, p. 562, 771; *Poggend. Ann.*, t. 81, 1850, p. 442; t. 82, 1851, p. 124).

Notice sur les travaux de M. H. Fizeau. Paris, Bachelier, 1850. In-4°, 16 pages.

Recherches sur la vitesse de propagation de l'électricité (en collaboration avec E. Gounelle) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 30, 1850, p. 437).

Dépose le pli cacheté n° 988, le 15 avril 1850 (*Ibid.*, t. 30, 1850, p. 454).

Notes sur l'expérience relative à la vitesse comparative de la lumière dans l'air et dans l'eau (en collaboration avec L. Bréguet) (*Ibid.*, t. 30, 1850, p. 562, 771).

Remarques sur les expériences faites en 1848 et 1849 aux États-Unis par M. S. Walker et M. O.-M. Mitchel, pour déterminer la vitesse de la propagation de l'électricité (*Ibid.*, t. 32, 1851, p. 47).

Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur (*C. R. Ac. Sciences*, t. 33, 1851, p. 349; *Annales de Chimie*, t. 57, 1859, p. 385; *Poggend. Ann.*, 1853, p. 457).

Dépose le pli cacheté n° 1239, le 14 juin 1852 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 34, 1852, p. 923).

Constatation du mouvement de la Terre par les radiations calorifiques (*Cosmos*, 1852, p. 689; *Poggend. Ann.*, t. 92, 1854, p. 652).

Note sur les machines électriques inductives et sur un moyen facile d'accroître leurs effets (*C. R. Ac. Sciences*, t. 36, 1853, p. 418; *Poggend. Ann.*, t. 89, 1853, p. 173).

Lettre relative à une médaille frappée en l'honneur de la famille de Jussieu (en collaboration avec M. Ramond) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 38, 1854, p. 1082).

Notice sur les travaux de M. H. Fizeau. Paris, Mallet-Bachelier, 1859, In-4°, 19 pages.

Sur une méthode propre à rechercher si l'azimut de polarisation du rayon réfracté est influencé par le mouvement du corps réfringent (*C. R. Ac. Sciences*, t. 49, 1859, p. 717; *Annales de Chimie*, t. 58, 1860, p. 129; *Poggend. Ann.*, t. 109, 1860, p. 160, 554).

Recherches sur plusieurs phénomènes relatifs à la polarisation de la lumière (*C. R. Ac. Sciences*, t. 52, 1861, p. 267, 1221; *Annales de Chimie*, t. 63, 1861, p. 385; *Phil. Mag.*, t. 21, 1861, p. 438; *Poggend. Ann.*, t. 116, 1862, p. 478).

Note sur la lumière émise par le sodium brûlant dans l'air (*C. R. Acad. Sciences*, t. 54, 1862, p. 493; *Chemical News*, 1862, p. 150; *Poggend. Ann.*, t. 116, 1862, p. 492, 562).

Recherches sur les modifications que subit la vitesse de la lumière dans le verre et plusieurs autres corps solides sous l'influence de la chaleur (*C. R. Ac. Sciences*, t. 54, 1862, p. 1237; *Annales de Chimie*, t. 66, 1862, p. 429; *Poggend. Ann.*, t. 119, 1863, p. 87, 297).

Rapport sur le concours pour le prix Bordin de 1862 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 55, 1862, p. 944).

Rapport sur un appareil de photographie présenté par M. de Poilly (*Ibid.*, t. 56, 1863, p. 681).

Recherches sur la dilatation et la double réfraction du cristal de roche échauffé (*C. R. Ac. Sciences*, t. 58, 1864, p. 923; *Annales de Chimie*, 1864, p. 143; *Ann. Phys. Chem.*, t. 123, 1864, p. 515).

Rapport sur un Mémoire et plusieurs Notes de M. J. Janssen, relatifs à l'analyse prismatique de la lumière solaire et de celle de plusieurs étoiles (Fizeau, rapporteur) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 58, 1864, p. 795).

Sur la dilatation du diamant et du protoxyde de cuivre cristallisé, sous l'influence de la chaleur (*C. R. Ac. Sciences*, t. 60, 1865, p. 1161; *Ann. Phys. Chem.*, t. 126, p. 611).

Rapport sur le concours Bordin de l'année 1865, question proposée pour 1862 et prorogée. Mémoire sur les raies telluriques du spectre solaire, par M. J. Janssen; Vérification des lames cristallisées parallèles à l'axe, par M. H. Soleil; Recherches sur les indices de réfraction, par M. Pichot (*C. R. Ac. Sciences*, t. 62, 1866, p. 485).

Mémoire sur la dilatation des corps solides par la chaleur (*C. R. Ac. Sciences*, t. 62, 1866, p. 1101, 1133; *Annales de Chimie*, t. 8, 1866, p. 335; *Ann. Phys. Chem.*, t. 128, 1866, p. 564).

Sur la propriété que possède l'iodure d'argent de se contracter par la chaleur et de se dilater par le froid (*C. R. Ac. Sciences*, t. 64, 1867, p. 314; *Ann. Phys. Chem.*, t. 132, 1867, p. 292).

Rapport sur le concours du prix Bordin, année 1866 (Déterminer les indices de réfraction des verres employés en optique). Mémoire de M. Baille (*C. R. Ac. Sciences*, t. 64, 1867, p. 450).

Rapport sur le concours du prix Bordin, année 1866 (Déterminer les longueurs d'onde de quelques rayons de lumière simple). Mémoire de M. E. Mascart (*Ibid.*, t. 64, 1867, p. 454).

Nouvelles observations relatives à l'iodure d'argent (*Ibid.*, t. 64, 1867, p. 771).

Observations au sujet d'un Mémoire de M. H. Sainte-Claire Deville sur les propriétés des huiles minérales (*Ibid.*, t. 66, 1868, p. 455).

Rapport sur le concours du prix Bordin de l'année 1867 (Question relative à la direction des vibrations dans les rayons polarisés) (*Ibid.*, t. 66, 1868, p. 932).

Présente à l'Académie deux Ouvrages, l'un de M. Angstrom, l'autre de M. Thalen sur le spectre solaire et les spectres des métaux, et signale les parties nouvelles que présentent ces travaux (*Ibid.*, t. 66, 1868, p. 946).

Sur la dilatation des corps solides par la chaleur (*C. R. Ac. Sciences*, t. 66, 1868, p. 1005, 1072; *Ann. Phys. Chem.*, t. 135, 1868, p. 372; *Phil. Mag.*, 1868, p. 31).

Tableau des dilatations par la chaleur de divers corps simples solides métalliques ou non métalliques et de quelques composés hydrogénés du carbone (*C. R. Ac. Sciences*, t. 68, 1869, p. 1125; *Les Mondes*, t. 20, 1869, p. 139; *Ann. Phys. Chem.*, 1869, p. 26).

Remarques à l'occasion d'un passage du Rapport verbal de M. Faye sur les travaux spectroscopiques de M. Zoellner, passage relatif au déplacement des raies du spectre par le mouvement du corps lumineux ou de l'observateur (*C. R. Ac. Sciences*, t. 69, 1869, p. 743).

Remarques à l'occasion d'un passage du Rapport verbal de M. Faye, du 20 septembre dernier, relatif au déplacement des raies du spectre, par le mouvement du corps lumineux ou de l'observateur. Note de M. Fizeau avec la réponse de M. Faye (*Ibid.*, t. 69, 1869, p. 743).

Tableau des coefficients de dilatation de divers corps solides (*Les Mondes*, t. 20, 1869, p. 137).

Remarques sur quelques erreurs qui se sont glissées dans une communication du P. Secchi concernant certaines observations spectrales du Soleil (*C. R. Ac. Sciences*, t. 70, 1870, p. 1013).

Nouvelles remarques concernant le déplacement des raies spectrales par le mouvement du corps lumineux ou de l'observateur (*Ibid.*, t. 70, 1870, p. 1063).

Des effets du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d'onde des rayons de lumière (Extr. des *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. 19, 1870, p. 211-221. Paris, Gauthier-Villars, 1870).

Observations sur une Communication de M. Vicaire, relative à la température de la surface solaire (*C. R. Ac. Sciences*, t. 74, 1872, p. 36).

Rapport sur un Mémoire de M. Croullebois, relatif à la double réfraction elliptique du quartz (*Ibid.*, t. 74, 1872, p. 1174).

Observations à propos d'une Communication de M. Le Verrier, sur la mesure de la vitesse de la lumière par des moyens purement physiques (*Ibid.*, t. 75, 1872, p. 172).

Rapport sur les comparateurs (*Ann. Cons. Arts. et Métiers*, t. 10, 1873, p. 86).

Observations relatives à une Communication faite par M. Ed. Jannettaz, sur la conductibilité thermique dans les roches et dans les corps en général (*C. R. Ac. Sciences*, t. 78, 1874, p. 1205).

Observations sur une question de priorité soulevée par M. Laussedat au sujet de l'appareil photographique adopté par la Commission du passage de Vénus (*Ibid.*, t. 79, 1874, p. 455).

Rapport sur le concours du grand prix de Mathématiques pour l'année 1872 (Rechercher les modifications qu'éprouve la lumière dans son mode de propagation et ses propriétés, par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur). Mémoire de M. E. Mascart (*Ibid.*, t. 79, 1874, p. 1531).

Avis de la Commission des paratonnerres sur une disposition nouvelle proposée par les magasins à poudre (M. Fizeau, rapporteur) (*Ibid.*, t. 80, 1875, p. 1440).

Observations relatives à une Communication de M. Fonvielle sur le radiomètre de M. Crookes (*Ibid.*, t. 82, 1876, p. 1252).

Observations sur une Communication de M. Govi, sur la cause des mouvements dans le radiomètre de M. Crookes (*Ibid.*, t. 82, 1876, p. 1413).

Rapport sur la photographie par images directes, présenté à la Commission du Passage de Vénus, dans la séance du 22 février 1873. Paris, 1876, t. 1, 2^e Partie, p. 315 (Bibliothèque de l'Institut : in-4^o).

Rapport sur l'appareil photographique, présenté à la Commission du Passage de Vénus, dans la séance du 8 mars 1873. Paris, 1876; t. 1, 2^e Partie, p. 329 (Bibliothèque de l'Institut : in-4^o).

Programme des opérations photographiques qui devront être exécutées simultanément dans toutes les stations, d'après une décision prise par la Commission du Passage de Vénus, dans la séance du 6 avril 1874 (M. Fizeau, rapporteur). Paris, 1876; t. 1, supplément à la 2^e Partie, p. 1 (Bibliothèque de l'Institut : in-4^o).

Notes pratiques sur les opérations de la photographie pendant le prochain passage de Vénus sur le Soleil, sur la demande de la Sous-Commission de Photographie, Paris, 1876, t. 1, supplément à la 2^e Partie, p. 11 (Bibliothèque de l'Institut : in-4^o).

Rapport sur un Mémoire de M. H. Becquerel intitulé : « Recherches expérimentales sur la polarisation rotatoire magnétique » (*C. R. Ac. Sciences*, t. 84, 1877, p. 211).

Observations relatives à une Communication de M. Berthelot relative à la valeur de la loi de Dulong et Petit sur les chaleurs spécifiques (*Ibid.*, t. 84, 1877, p. 1274).

Discours prononcé par M. Fizeau aux funérailles de M. Antoine-César Becquerel (*Ibid.*, t. 86, 1878, p. 125).

Institut de France (Académie des Sciences). Funérailles de M. Antoine-César Becquerel, le 21 janvier 1878. Discours de M. Fizeau (et de M. Daubrée). Paris, Firmin-Didot, 1878, In-4^o, 11 pages.

Rapport sur le concours du prix La Caze (Physique) pour 1877 (travaux de M. A. Cornu) (*C. R. Ac. Sciences*, t. 86, 1878, p. 166).

Institut de France (Académie des Sciences). Recueil de Mémoires, Rapports et Documents relatifs à l'observation du passage de Vénus sur le Soleil. Extrait du Tome III : *Documents relatifs aux mesures des épreuves photographiques*. Fascicule A comprenant le résumé des études de la Sous-Commission chargée de la mesure des épreuves et les documents qui s'y rattachent, par MM. Fizeau et Cornu. Paris, 1878 (Bibliothèque de l'Institut : in-4^o).

Présenté à l'Académie avec le fascicule A des mesures et des épreuves photographiques du passage de Vénus (*C. R. Ac. Sciences*, t. 86, 1878, p. 755).

Longueur d'onde des rayons calorifiques (*Annales de Chimie*, t. 15, 1878, p. 394).

Discours prononcé à la séance publique annuelle du 10 mars 1879 (*C. R. Ac. Sciences*, t. 88, 1879, p. 445),

Rapport sur le Grand Prix des Sciences mathématiques de l'année 1878 (Étude de l'élasticité des corps cristallisés) Concours prorogé à 1880 (*Ibid.*, t. 88, 1879, p. 451).

Résumé des mesures effectuées sur les épreuves daguerriennes du passage de Vénus en 1874, obtenues par la Commission française par H. Fizeau et Cornu (*Ibid.*, t. 95, 1882, p. 1082).

Rapports relatifs au concours du prix La Caze, 1883 (*Ibid.*, t. 98, 1884, p. 1098).

Institut de France (Académie des Sciences). Funérailles de M. Desains, le 6 mai 1885. Discours de M. Fizeau (et de MM. Troost et Méziers). Paris, Firmin-Didot, 1885. In-4°, 19 pages.

Observation relative à une Communication de M. Cornu concernant l'influence du milieu sur la vitesse de la lumière (*C. R. Ac. Sciences*, t. 102, 1886, p. 1209).

Rapport, fait au nom de la Section de Physique, en réponse à une lettre de M. le Ministre de l'Instruction publique, sur diverses questions concernant l'établissement des paratonnerres sur les bâtiments des lycées (*Ibid.*, t. 103, 1886, p. 1109).

Rapport sur une Note de M. Roques, relative à un nouveau métronome basé sur l'isochronisme des petites oscillations du pendule (*Ibid.*, t. 104, 1887, p. 653).

Recherches sur certains phénomènes relatifs à l'aberration de la lumière (*Ibid.*, t. 104, 1887, p. 935).

Sur certaines inflexions dans la direction des sons, qui doivent parfois rendre inefficaces les signaux sonores en usage dans la navigation (*Ibid.*, t. 104, 1887, p. 1347).

Rapports relatifs au concours du prix La Caze, 1883 (*Ibid.*, t. 105, 1887, p. 1325).

Sur les canaux de la planète Mars (*Ibid.*, t. 106, 1888, p. 1759).

Institut de France (Académie des Sciences). Discours prononcés à l'occasion de la cérémonie d'inauguration de la statue de Le Verrier à l'Observatoire de Paris, le 27 juin 1889 (par MM. Fizeau, J. Bertrand, contre-amiral E. Mouchez, Tisserand, O. Struve. Paris, Firmin-Didot, 1889. In-4°, 41 pages.

Remarques sur l'influence que l'aberration de la lumière peut exercer sur les observations des protubérances solaires par l'analyse spectrale (*C. R. Ac. Sciences*, t. 113, 1891, p. 353).

Institut de France (Académie des Sciences). Funérailles de M. Edmond Becquerel, le 14 mai 1891. Discours prononcé par M. Fizeau (suivi du discours de M. E. Frémy). Paris, Firmin-Didot, (s. d.). In-4°, 9 pages.

Fait des réserves sur l'interprétation des clichés, qui semblent retouchés, des « photographies agrandies de la Lune », de M. Weineke (*C. R. Ac. Sciences*, t. 116, 1893, p. 422).

Rapport sur le concours du prix Saintour, 1894 (*Ibid.*, t. 119, 1894, p. 1127).

Remarques sur la constance moyenne d'éclat des principales étoiles (*Ibid.*, t. 121, 1895, p. 516).

Présente à l'Académie, au nom du P. Colin, une photographie de l'observatoire de Tananarive (*Ibid.*, t. 121, 1895, p. 515).

M. le Président de l'Académie des Sciences annonce la mort de M. H. Fizeau et rappelle ses principaux travaux (*Ibid.*, t. 123, 1896, p. 471).

Institut de France (Académie des Sciences). Funérailles de M. Hippolyte Fizeau, le mardi 22 septembre 1896, à Jouarre. Discours prononcé, au nom de l'Académie des Sciences et du Bureau des Longitudes, par A. Cornu (*Recueil de l'Institut*, t. 66, 1896, n° 17).

Notice sur l'œuvre scientifique de H. Fizeau, par M. A. Cornu (Extr. de l'*Annuaire pour l'an 1898, publié par le Bureau des Longitudes*). Paris, 1898 (Bibliothèque de l'Institut : in-8°).

Biographie et travaux de H. Fizeau (voir *Amer. Journ. Science*, t. 2, 1896, p. 398; *Astrophys. Journ.*, t. 4, 1896, p. 367; *Electricien*, t. 37, 1896, p. 699; *Leopoldina*, t. 32, 1896, p. 182; *Nature*, t. 54, 1896, p. 523; *Nyt. Tidsskr. Fys. Kem.*, t. 1, 1896, p. 439).

