

TIRAGE A PART

(Recueil des Conférences d'actualités scientifiques et industrielles)

LA CRISE RÉCENTE

DE

L'OPTIQUE ONDULATOIRE

CONFÉRENCE

FAITE AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

LE 17 AVRIL 1929

PAR

L. DE BROGLIE

MAÎTRE DE CONFÉRENCES A LA SORBONNE



Inv. n = 747

ACADÉMIE
DES SCIENCES

Fonds L. de BROGLIE

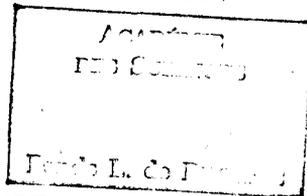
PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C^o

6, RUE DE LA SORBONNE, 6

1930

In. n° 2830



LA CRISE RECENTE DE L'OPTIQUE ONDULATOIRE (1)

Par M. L. DE BROGLIE,

Maître de Conférences à la Sorbonne.



On ne saurait exagérer l'importance de la lumière dans l'ensemble des phénomènes naturels. Non seulement elle est nécessaire à la vie sous toutes ses formes, mais le développement de la physique nous a appris que les substances matérielles et la lumière échangent constamment de l'énergie de telle façon que l'état du monde qui nous entoure peut être regardé comme le résultat d'une sorte de vaste équilibre entre la matière et la lumière.

On conçoit donc l'intérêt primordial qui s'attache à la question de déterminer les propriétés de la lumière et de classer les phénomènes où elle intervient. Cette étude faiblement esquissée par l'antiquité ne s'est véritablement développée qu'à partir du xvii^e siècle. A dater de ce moment, la découverte d'un nombre croissant de phénomènes lumineux de plus en plus délicats à observer a permis de constituer une vaste science, l'optique, dont le domaine a sans cesse été en s'élargissant. Mais en optique comme dans toutes les autres branches de la science humaine, on ne s'est pas contenté d'observer des faits et d'en faire un catalogue, on a cherché à comprendre ce que l'on observait, on a cherché à se faire une idée de la nature intime de la lumière de façon à interpréter les faits connus et à en prévoir de nouveaux. Dès le début de ces tentatives, deux grandes théories de la lumière se sont présentées à l'esprit des physiciens : l'une d'elles veut que la lumière soit formée par des corpuscules en mouvement, que les phénomènes lumineux soient dus au transport à travers l'espace de petits projectiles animés de grandes vitesses. L'autre théorie se forme de la lumière une idée bien différente : ce serait la propagation à travers l'espace d'un ébranlement, d'une onde analogue à celles que l'on voit se propager

(1) Conférence faite le 17 avril 1929. — Cette conférence a été publiée dans la *Revue scientifique illustrée*, n° 12, 22 juin 1929.

à la surface des nappes d'eaux ou à celles qui se propagent dans l'air donnant lieu aux phénomènes sonores. Implicitement cette deuxième conception suppose qu'il existe un milieu très subtil, l'éther, qui pénètre même dans les corps transparents les plus durs et dont les vibrations constituent la lumière. Faisons tout de suite une remarque : nous savons aujourd'hui que la lumière progresse dans l'espace vide avec l'énorme vitesse de 300.000 kilomètres par seconde; on devra donc, si l'on adopte la première théorie de la lumière, admettre que les corpuscules de lumière sont animés de cette vitesse et si l'on préfère la deuxième théorie, on devra dire que les ondes de lumière progressent dans l'espace vide à raison de 300.000 kilomètres par seconde.

Vous savez certainement tous que le développement de l'optique a amené, au XIX^e siècle, grâce surtout aux travaux de notre compatriote Augustin Fresnel, le triomphe de la seconde théorie, la théorie ondulatoire. Mais depuis une trentaine d'années, des faits nouveaux ont ramené l'attention sur la théorie corpusculaire et montré que la théorie ondulatoire n'était pas suffisante à elle seule pour expliquer tous les phénomènes produits par la lumière. A la suite de cette crise de l'optique ondulatoire, on s'oriente actuellement vers une théorie plus synthétique suivant laquelle la nature de la lumière ne peut être exactement décrite qu'en unissant l'idée de transport de corpuscules à l'idée de propagation d'ondes.

Avant d'entrer dans l'exposé de cette crise récente de l'optique ondulatoire, je veux d'abord étudier les caractères principaux qui opposent l'une à l'autre les deux conceptions adverses de la lumière. De cette façon, il nous sera plus facile de comprendre pourquoi la découverte de certains phénomènes a paru faire pencher définitivement la balance dans un certain sens alors que des faits plus récemment observés ont au contraire rétabli l'équilibre.

Et d'abord précisons un peu ce qu'il faut entendre par ondes.

Une onde qui se propage librement dans l'espace peut être conçue, vous le savez, comme formée par une suite de vagues dont les crêtes sont séparées par une distance constante appelée la longueur d'onde. L'ensemble des vagues se déplacent dans la direction de propagation de l'onde avec une certaine vitesse qui dépend des conditions de la propagation et que nous devons supposer égale à 300.000 kilomètres-seconde dans le vide et dans l'air. En un point fixe de l'espace, les différentes vagues avec leurs crêtes et leurs creux défilent successivement, la grandeur

qui se propage par ondes y varie donc périodiquement et la période de cette variation est évidemment égale au temps qui s'écoule entre le passage de deux crêtes consécutives. Par définition, on appelle fréquence de l'onde le nombre des périodes en une seconde, c'est-à-dire en somme le nombre des crêtes qui passent en un point fixe pendant une seconde. On se rend compte facilement : 1° que la fréquence est égale à l'inverse de la période; 2° que la longueur d'onde est égale au produit de la période par la vitesse de propagation de l'onde. Donc, des quatre grandeurs, longueur d'onde, période, fréquence, vitesse de propagation, deux seulement sont indépendantes, c'est-à-dire que si l'on donne deux des quatre grandeurs, on peut calculer les deux autres.

Nous venons de voir comment progresse une onde dans une région où rien ne vient entraver sa propagation. Les choses sont bien différentes si l'onde en se propageant vient se heurter à des obstacles, par exemple si elle rencontre des surfaces planes (de miroirs) qui l'arrêtent et la réfléchissent ou bien si elle doit passer au travers d'ouvertures percées dans des écrans. Alors l'onde sera comme déformée et repliée sur elle-même, de sorte qu'au lieu d'avoir affaire à une onde simple du type précédemment étudié, on a affaire à la superposition d'un certain nombre de ces ondes simples. L'état vibratoire résultant en chaque point dépendra alors de la façon dont les effets des diverses ondes simples s'ajoutent ou se contrarient. Si les ondes simples en un point ajoutent leurs effets, si elles sont, comme on le dit, en concordance de phase, la vibration résultante sera très forte; si, au contraire, les ondes se contrarient, si elles sont en opposition de phase, alors la vibration résultante peut être très faible ou même nulle. Or, on peut montrer que le fait qu'il y ait en un point concordance ou discordance de phase entre les ondes élémentaires dépend essentiellement de la longueur d'ondes de l'onde qui est venue se heurter à des obstacles. En résumé, la présence d'obstacles troublant la propagation d'une onde provoque l'apparition d'une répartition compliquée des intensités de vibration, répartition qui dépend essentiellement de la longueur d'onde de l'onde incidente. Ce sont là les phénomènes appelés « interférences des ondes ».

Si l'on adopte l'idée que la lumière est formée d'ondes, on est donc amené à prévoir que quand des obstacles s'opposent à la libre progression d'un faisceau de lumière, des phénomènes d'interférences doivent apparaître. Dans la région des in-

terférences la répartition de l'intensité de la lumière sera compliquée, mais pourra se prévoir à partir de la longueur d'onde, c'est-à-dire, comme nous le verrons, de la couleur, de la lumière employée. Il pourra notamment arriver qu'en un point où se croisent deux ondes lumineuses élémentaires en discordance de phase on obtienne de l'obscurité : circonstance assez imprévue qu'on a caractérisée en disant qu'en ajoutant de la lumière à de la lumière, on peut obtenir l'obscurité.

Les prévisions précédentes sont tout à fait caractéristiques de la théorie ondulatoire. Rien de semblable ne peut être annoncé par la théorie corpusculaire. Dans celle-ci, en effet, les petits projectiles qui constituent la lumière sont caractérisés par une vitesse qu'il est permis d'identifier avec la vitesse de propagation dans le milieu envisagé, mais, à moins de compliquer d'une manière très artificielle la notion de corpuscule, il n'y a rien dans cette notion qui corresponde à l'idée de longueur d'onde, rien par suite qui permette de prévoir des phénomènes d'interférences. Donc, si l'on peut obtenir avec la lumière des phénomènes d'interférences, la conception ondulatoire sera la seule acceptable.

Voici donc bien établie une différence essentielle entre les prévisions possibles des deux théories de la lumière. Examinons-en maintenant une seconde tout aussi importante.

Considérons une source de lumière, une flamme par exemple, qui émet de la lumière également dans toutes les directions. Si nous adoptons l'hypothèse corpusculaire, nous devons dire que la source de lumière envoie dans toutes les directions un grand nombre de petits projectiles se déplaçant en ligne droite. En disposant un petit écran à une certaine distance de la source, nous recueillerons sur cet écran servant de cible un certain nombre de projectiles par seconde et ce nombre mesurera la quantité de lumière reçue par l'écran en une seconde. Mais il suffit de se représenter par l'imagination cette salve de projectiles partant de la source pour se rendre compte que ces projectiles s'écartent les uns des autres au fur et à mesure qu'ils s'éloignent de la source. Il en résulte immédiatement que plus nous placerons l'écran loin de la source, plus faible sera le nombre des projectiles recueillis en une seconde sur l'écran. On peut d'ailleurs aisément démontrer que la diminution de ce nombre a lieu en raison inverse du carré de la distance entre la source et l'écran.

Supposons maintenant, au contraire, que la lumière soit for-

mée d'ondes. Alors nous devons imaginer que notre source est un centre d'ébranlement à partir duquel une ondulation se répand dans l'espace environnant et, puisque l'émission a lieu également dans toutes les directions, l'onde lumineuse émise aura la forme d'une onde sphérique dont la source sera le centre; en d'autres termes, l'ébranlement vibratoire que la source émet à l'instant 0 se retrouve à l'instant t réparti sur une sphère dont le rayon est égal à la distance que la lumière parcourt pendant le temps t dans le milieu entourant la source. Si nous plaçons un écran à une certaine distance de la source, nous pourrions recueillir sur cet écran par seconde toute l'énergie du mouvement vibratoire que l'onde apportera sur la surface de l'écran pendant une seconde. Il est encore facile de voir que la quantité de lumière ainsi recueillie par l'écran sera en raison inverse du carré de la distance à la source. Le résultat paraît donc le même dans l'une et l'autre conceptions. Mais, si l'on y réfléchit, on voit que la manière dont l'énergie lumineuse a été reçue par l'écran diffère beaucoup suivant que l'une ou l'autre théorie de la lumière est exacte. Si la lumière est granulaire, certains points privilégiés de l'écran auront reçu pendant la durée de l'illumination un corpuscule, c'est-à-dire une quantité finie et relativement grande d'énergie tandis que tous les autres points de l'écran n'auront rien reçu du tout. Si, au contraire, la lumière émise par la source forme une onde sphérique sur laquelle l'énergie est uniformément répartie, toutes les régions de l'écran reçoivent continuellement de l'énergie lumineuse pendant la durée de l'illumination de telle sorte qu'à la fin tous les points de l'écran ont reçu la même quantité de lumière d'ailleurs très faible. Dans la première conception, l'énergie totale reçue par l'écran se trouve avoir été recueillie par quelques points qui en ont ainsi obtenu chacun une quantité assez notable; dans la deuxième conception la même quantité totale d'énergie se trouve répartie uniformément entre tous les points de l'écran mais chacun d'eux n'en reçoit alors qu'une infime fraction. La seule chose qui soit identique dans les deux théories c'est la quantité totale de lumière reçue par l'ensemble de l'écran lorsqu'il est placé pendant un temps donné à une distance donnée de la source.

La différence que nous venons de signaler entraîne une conséquence d'une extrême importance. Imaginons un mécanisme qui ne puisse fonctionner que si on lui fournit d'un seul coup une quantité d'énergie au moins égale à E . Si ce mécanisme est

placé très près de la source de lumière, il pourra, dans les deux hypothèses, être mis en action par la lumière, mais s'il est loin de la source, alors dans l'hypothèse ondulatoire il ne pourra jamais être mis en action car l'onde lumineuse sur laquelle l'énergie est supposée uniformément répartie ne lui apporte jamais assez d'énergie à la fois pour le déclencher. Au contraire, dans l'hypothèse corpusculaire, le mécanisme placé très loin de la source aura évidemment peu de chance d'être rapidement atteint par un corpuscule de lumière, mais, au bout d'un temps plus ou moins long, il finira bien tout de même par en recevoir un et si ce corpuscule contient une quantité d'énergie égale ou supérieure à E , le mécanisme fonctionnera. Si donc on parvient à prouver que même très loin de la source la lumière possède la possibilité de produire des déclenchements exigeant une certaine quantité d'énergie, on aura obtenu une preuve irréfutable de la constitution granulaire de la lumière.

Nous voici maintenant à peu près en état de comprendre les principales péripéties de la lutte qui s'est poursuivie depuis trois siècles entre les deux conceptions de la lumière.

Les phénomènes lumineux les plus simples, ceux qui ont été les premiers étudiés avec précision au $xvii^e$ siècle, sont la propagation rectiligne de la lumière, la réflexion et la réfraction. La propagation rectiligne de la lumière consiste en ceci que, dans la plupart des cas, la lumière se propage en ligne droite. Par exemple, considérons une source de dimensions assez petites pour qu'on puisse la considérer comme ponctuelle et plaçons devant elle un écran percé d'un trou : derrière l'écran, la région éclairée est très sensiblement limitée par l'ensemble des droites partant de la source et s'appuyant sur le rebord du trou. Tout se passe donc comme si la lumière se propageait le long de droites qu'on nomme les rayons de lumière. Dans la conception granulaire, ce fait s'expliquerait immédiatement : la source projetterait des corpuscules qui décriraient des lignes droites, ces lignes droites seraient les trajectoires de la lumière, ce serait les rayons. Au contraire, la théorie ondulatoire ne peut pas rendre compte d'une façon aussi simple de ce fait fondamental.

Il en est de même pour la réflexion de la lumière. Quand de la lumière tombe sur un miroir plan, elle est réfléchie de telle manière que l'angle des rayons réfléchis avec la normale au miroir est égal à l'angle des rayons incidents avec cette même normale, c'est la loi de la réflexion de Descartes. Cette loi coïncide

tout à fait avec la loi de réflexion d'une bille contre un obstacle élastique : d'après les lois de la mécanique, la trajectoire rectiligne de la bille après le choc contre l'obstacle fait avec la normale à celui-ci le même angle que la trajectoire rectiligne avant le choc. L'interprétation de la réflexion de la lumière par la théorie corpusculaire est donc immédiate tandis qu'elle semble moins évidente dans la théorie des ondes.

Le phénomène de la réfraction de la lumière consiste en ceci qu'un rayon lumineux en passant d'un milieu dans un autre subit en général à l'entrée du deuxième milieu une inflexion, une brisure. Descartes a donné la loi exacte du phénomène. La réfraction de la lumière est déjà un peu moins aisée à expliquer dans la théorie granulaire que les phénomènes précédents, néanmoins on peut encore l'interpréter en faisant certaines hypothèses sur la vitesse des particules de lumière dans les divers milieux matériels.

Tels étaient les principaux faits optiques connus vers 1670 et vous voyez qu'à cette époque la théorie corpusculaire pouvait à juste titre paraître satisfaisante. Néanmoins dès cette époque un esprit très pénétrant, le hollandais Christian Huyghens, avait affirmé sa préférence pour la théorie ondulatoire et avait fortement motivé cette préférence. Grâce à des raisonnements qui sont aujourd'hui encore classiques en physique, il était parvenu à montrer que la conception des ondes permettait elle aussi de retrouver les lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction. Il avait aussi découvert les phénomènes de double réfraction du spath d'Islande et en avait donné une interprétation ondulatoire.

Vers la fin du XVII^e siècle, Newton découvrit de nouveaux faits optiques très importants. Tout d'abord, il montra que la lumière blanche n'est pas simple; en lui faisant traverser un prisme de verre, on peut la décomposer en une infinité de lumières colorées dont les couleurs vont du violet au rouge par gradation insensible et forment ce qu'on appelle « le spectre ». Chaque lumière du spectre est simple, indécomposable : elle est caractérisée par une couleur bien définie. Il est donc nécessaire de faire correspondre à chaque couleur spectrale une espèce particulière de lumière. Ceci constitue déjà pour la théorie corpusculaire une légère difficulté car, les corpuscules de lumière devant tous avoir dans le vide la même vitesse, on ne voit guère ce qui peut distinguer deux corpuscules de couleurs différentes. Pour la théorie ondulatoire au contraire la réponse

est très simple car ici nous disposons, pour caractériser une onde, de deux grandeurs différentes, par exemple la vitesse de propagation et la longueur d'onde, et, si les ondes lumineuses ont toutes dans le vide la même vitesse de propagation, elles peuvent se distinguer par leurs longueurs d'onde : on est ainsi amené à dire que chaque couleur correspond à une longueur d'onde.

Newton découvrit aussi un autre phénomène important. Lorsque de la lumière blanche tombe sur une lame mince, par exemple une mince couche d'huile répandue à la surface d'un liquide ou d'une mince couche d'air limitée par deux morceaux de verre, on aperçoit en général des anneaux colorés. En réalité ce phénomène est un phénomène d'interférences et ne peut être expliqué simplement que par la théorie ondulatoire. Néanmoins, Newton, qui fut toujours personnellement partisan de la conception corpusculaire, chercha à compliquer cette conception d'une façon à la fois ingénieuse et un peu artificielle de façon à obtenir une explication des anneaux colorés. Après Newton, pendant tout le xviii^e siècle, l'optique fit peu de progrès et les physiciens admettaient alors en général la théorie corpusculaire, qui, dans cette lutte, paraissait avoir gagné la première manche.

C'est au début du siècle dernier qu'eurent lieu les découvertes qui amenèrent le triomphe de l'hypothèse des ondes : ces découvertes, ce furent celles des phénomènes d'interférences de la lumière et elles sont dues à l'Anglais Thomas Young et au Français Augustin Fresnel. Je vous ai expliqué en quoi consistent, en principe, les phénomènes d'interférences et comment ils ne peuvent être interprétés que par une propagation d'ondes. Augustin Fresnel, après avoir achevé la découverte expérimentale de ces phénomènes commencée par Young, eut le grand mérite d'en donner l'interprétation complète par la théorie ondulatoire et il montra de plus que tous les autres faits optiques connus de son temps pouvaient s'interpréter aisément à l'aide de cette même théorie. Huyghens avait déjà montré, nous l'avons dit, que l'hypothèse des ondes explique les lois de la réflexion et de la réfraction, mais il n'avait pu faire voir comment elle est compatible avec le fait simple de la propagation rectiligne. Fresnel combla cette lacune en montrant que la propagation rectiligne dans les conditions où on l'observe est aussi une conséquence de la propagation des ondes. Dès lors la théorie ondulatoire se trouvait avoir expliqué tous les faits qui, au premier

abord, paraissaient favorables à une constitution granulaire de la lumière et, de plus, elle expliquait les phénomènes d'interférences : elle sortait donc triomphante de la lutte et pendant longtemps on n'allait plus avoir aucune raison de douter de son exactitude.

Comme les phénomènes d'interférences dépendent de la longueur d'onde de l'onde qui les produit, l'étude de ces phénomènes a permis de mesurer la longueur d'onde des diverses sortes de lumière. On a pu ainsi vérifier que chaque lumière simple du spectre est bien caractérisée par sa longueur d'onde et que la longueur d'onde varie en croissant d'une façon continue depuis l'extrémité violette du spectre, où elle est de $4/10.000^{\text{es}}$ de millimètre environ, jusqu'à l'extrémité rouge, où elle atteint $8/10.000^{\text{es}}$ de millimètre.

Pendant le cours du siècle dernier, les physiciens ont accompli en optique un énorme travail que l'on peut résumer en disant : toutes les prévisions de la théorie ondulatoire ont été vérifiées avec une extrême précision et jusque dans les moindres détails. Le fait que la lumière est formée d'ondes paraissait donc, il y a une trentaine d'années, inébranlablement démontré. Une seule chose semblait encore pouvoir prêter à discussion : la nature exacte de ces ondes. Fresnel les avait considérées comme des ondes élastiques transversales se propageant dans un milieu hypothétique, l'éther, qui imprégnerait tous les corps. Maxwell avait montré ensuite qu'on pouvait regarder la vibration lumineuse comme une vibration électromagnétique et réunir ainsi les domaines de l'optique et de l'électricité. Mais il restait difficile de préciser ce qui vibre dans une onde lumineuse.

Depuis cinquante ans le domaine de l'optique et de la théorie des ondes a été considérablement élargi par la découverte de nouvelles sortes d'ondes qui diffèrent de la lumière uniquement par leur longueur d'ondes (plus grande ou plus petite que celle de la lumière ordinaire). Les nouvelles ondes étaient longtemps restées inconnues parce qu'elles n'impressionnent pas notre œil, mais elles sont susceptibles d'exercer certaines actions physiques (échauffement, impression photographique, effets électriques, etc.) et c'est là ce qui a permis aux physiciens de découvrir leur existence. Ces ondes, qui sont identiques à la lumière (à la longueur d'onde près), mais que notre œil ne peut percevoir, on leur donne le nom général de radiations et les diverses sortes de lumières n'apparaissent que comme un petit groupe

dans le grand ensemble des radiations. Grâce aux découvertes faites successivement depuis cinquante ans, nous connaissons aujourd'hui presque sans lacunes toutes les radiations dont les longueurs d'ondes s'échelonnent depuis 50 kilomètres jusqu'à 1 dix milliardième de millimètre. De 50 kilomètres jusqu'à $1/10^6$ de millimètre, on a l'immense domaine des radiations hertziennes bien connues à cause de leur emploi en T.S.F. De $1/10^6$ de millimètre jusqu'à $8/10.000^{\text{es}}$ de millimètre ce sont les radiations infrarouges à fort effet calorifique. De $8/10.000^{\text{es}}$ de millimètre à $4/10.000^{\text{es}}$ de millimètre nous trouvons la lumière visible du rouge au violet. De $4/10.000^{\text{es}}$ de millimètre jusqu'à $1/10.000^{\text{es}}$ de millimètre s'étend le domaine ultra-violet. Puis vient le grand domaine des rayons X de $1/10.000^{\text{e}}$ de millimètre environ jusqu'à 1 cent millionième de millimètre environ. Au delà, avec des longueurs d'onde plus courtes encore, se trouvent les rayons très pénétrants émis par les corps radioactifs. Les radiations de cette énorme gamme sont bien toutes formées d'ondes car avec toutes on peut obtenir des interférences et c'est même en général à l'aide de ces interférences qu'on mesure leurs longueurs d'ondes.

Il y a une trentaine d'années, la nature ondulatoire de la lumière et de toutes les radiations paraissait si fortement établie que la découverte d'un phénomène en contradiction avec la conception des ondes pouvait sembler tout à fait impossible. Néanmoins l'in vraisemblable s'est réalisé et nous connaissons maintenant des phénomènes de ce genre. Le plus important de tous est l'effet photo-électrique : voici en quoi il consiste. Vous savez que la matière contient dans son sein un nombre énorme de petites charges électriques ponctuelles que l'on nomme des électrons. A l'état normal, ces charges ne peuvent sortir de la matière. Pour les en faire sortir il faut leur fournir une certaine quantité d'énergie qui dépend d'ailleurs du corps considéré et de la position occupée par les électrons dans ce corps. L'expulsion des électrons par la matière est donc précisément analogue à un de ces mécanismes à déclenchement dont nous avons déjà parlé qui exige, pour entrer en fonctionnement, l'apport instantané d'une certaine quantité d'énergie. Or, l'expérience a prouvé qu'en éclairant un morceau de matière avec une radiation, on peut déclencher cette explosion des électrons hors de la matière à condition toutefois que la fréquence de cette radiation soit assez élevée ou, ce qui revient au même, que sa longueur d'onde soit assez courte. C'est ce qu'on nomme l'effet photo-électrique. Mais le point essentiel est le suivant : l'effet photo-électrique

est indépendant de l'intensité de la lumière. Si l'on place le morceau de matière très loin de la source, il y a toujours des électrons expulsés par effet photo-électrique si la fréquence est suffisamment élevée. Plus on est loin de la source, moins il y aura d'électrons expulsés par seconde, mais enfin il y en aura toujours quelques-uns de temps à autre; en d'autres termes, la lumière, bien que très faible, est capable, si sa fréquence est suffisante, de déclencher le mécanisme d'expulsion. Comme nous l'avons vu, ceci ne peut s'expliquer qu'en admettant une structure granulaire de la lumière, et, puisqu'il faut, pour obtenir l'effet photo-électrique, que la fréquence ait au moins une certaine valeur minima, chaque corpuscule de lumière doit transporter une quantité d'énergie qui est d'autant plus grande que la fréquence est plus élevée. En d'autres termes, la lumière violette pouvant produire des effets photo-électriques que la lumière rouge est incapable de déclencher, le corpuscule de lumière violette doit contenir plus d'énergie que le corpuscule de lumière rouge.

Ces conclusions dérivent en quelque sorte directement de l'expérience; en y réfléchissant, les physiciens se sont aperçus qu'elles se rattachent intimement à des difficultés qui s'étaient présentées dans le développement de certaines théories. Encouragés par leurs succès, les physiciens étaient en effet devenus de plus en plus hardis. D'une part, ils avaient cherché à comprendre comment les radiations sont émises et absorbées par la matière. D'autre part, ils avaient aussi cherché à se figurer comment est constituée la matière elle-même, et ils étaient parvenus à cette idée que la matière est constituée par des éléments extrêmement petits, les atomes, et que les atomes eux-mêmes sont des édifices formés par des charges électriques et, en particulier, des électrons. Ils ont donc cherché à construire une théorie cohérente expliquant la façon dont ces atomes formés d'électrons émettent et absorbent les radiations, c'est-à-dire, en somme, la façon dont se réalise dans l'univers une sorte d'équilibre d'énergie entre la matière et la radiation. On a été ainsi amené, pour obtenir des résultats raisonnables et en accord avec les faits, à adopter l'hypothèse suivante énoncée pour la première fois vers 1900 par le grand savant allemand Max Planck : « la matière ne peut émettre ou absorber une radiation de fréquence ν que par quantités d'énergie finies et égales à $h\nu$ », h étant une certaine constante dont M. Planck a donné la valeur numérique, et qu'on nomme pour cela la constante de Planck.

Tous les développements ultérieurs des théories sur l'émission et l'absorption des radiations par la matière et sur la structure des atomes, et en particulier la célèbre théorie de Bohr, ont confirmé l'hypothèse de Planck. Cette hypothèse s'interprète immédiatement avec la théorie corpusculaire; elle signifie simplement que la radiation de fréquence ν est formée de corpuscules d'énergies $h\nu$. C'est sous cette forme précise que M. Einstein a, le premier, repris en 1905 la vieille conception corpusculaire, et de suite il en a tiré une conséquence importante. Soit, en effet, une radiation de fréquence ν , tombant sur un morceau de matière qui contient des électrons auxquels il faut fournir une certaine quantité E d'énergie pour les faire sortir; si la fréquence de la radiation est assez faible pour que $h\nu < E$, il n'y aura pas d'effet photo-électrique; mais si $h\nu > E$, un des électrons de la matière pourra absorber l'énergie $h\nu$ d'un des corpuscules de la lumière incidente, et alors il sortira de la matière avec l'énergie $h\nu - E$ puisqu'il doit dépenser l'énergie E pour sortir. Telle est la loi photo-électrique d'Einstein, et cette loi a été vérifiée pour la lumière violette et avec une plus grande précision encore pour les rayons X et γ . L'exactitude de la loi photo-électrique paraît bien établir l'existence des corpuscules de lumière, et, aujourd'hui, on parle couramment de ces corpuscules en les désignant sous le nom de « photons ».

La découverte d'un autre phénomène est venue plus récemment confirmer la réalité des photons. C'est le phénomène découvert par le savant américain H.-A. Compton, et qui porte son nom. Lorsqu'un faisceau de rayons X tombe sur un morceau de matière, une petite partie des rayons X est éparpillée dans toutes les directions; on dit qu'il y a diffusion des rayons X. Eh bien ! les rayons X diffusés présentent une fréquence un peu plus faible que la fréquence des rayons X incidents. Voici, en gros, comment on explique ce fait avec l'hypothèse corpusculaire. Dans la matière, il y a beaucoup d'électrons dont certains sont au repos ou en mouvement peu rapide; si les rayons X incidents de fréquence ν sont formés, comme le veut l'hypothèse corpusculaire, de photons d'énergie $h\nu$, il peut y avoir une rencontre, un choc, entre un photon de faisceau X incident et un électron de la matière. Comme le photon est en mouvement très rapide et l'électron en repos, le choc a pour résultat que l'électron prend au photon un peu de son énergie et se met en mouvement; le photon, lui, est dévié de sa route et renvoyé latéralement avec une énergie plus faible que son énergie initiale, son

$h\nu$ a donc diminué par suite du choc et, par conséquent, sa fréquence a diminué. L'expérience a permis de vérifier en détail toutes les prévisions de la théorie que je viens d'esquisser, et l'existence des photons s'est ainsi trouvée fortement confirmée.

Et, maintenant, vous comprenez bien pourquoi l'on peut dire que l'optique, depuis quelques années, traverse une crise grave ! D'une part, il y a tout l'ensemble des phénomènes d'interférences qui vérifient d'une façon si précise la théorie ondulatoire et permettent d'attribuer à chaque espèce de radiation une fréquence et une longueur d'onde. D'autre part, il y a le phénomène photo-électrique, le phénomène de Compton et toute une suite de raisons tirées de l'expérience et de la théorie qui militent en faveur d'une structure granulaire de la lumière. Il a donc bien fallu s'orienter bon gré mal gré vers une théorie synthétique qui admet que les radiations sont formées à la fois d'ondes et de corpuscules intimement liés. Seulement, cette théorie synthétique est très difficile à développer, et c'est pour cela qu'il y a crise.

Je ne puis ici vous donner qu'un aperçu un peu vague de la façon dont tend à se développer cette nouvelle théorie de la lumière. Dans l'ancienne conception des ondes, on admettait plus ou moins implicitement que les ondes lumineuses étaient les vibrations d'un milieu hypothétique et que, par suite, l'énergie de vibration était distribuée dans l'onde d'une façon continue. Mais ceci est en opposition avec l'effet photo-électrique, car celui-ci exige que l'énergie lumineuse soit concentrée en corpuscules. Et cependant, malgré l'existence de l'effet photo-électrique, il faut conserver l'idée des ondes pour continuer à pouvoir définir la fréquence et la longueur d'onde et rendre compte des interférences. Voici alors la solution que l'on envisage aujourd'hui : un faisceau de lumière, dont la fréquence est ν et la longueur d'onde λ , serait formé par une onde ayant cette fréquence et cette longueur d'onde, mais cette onde ne pourrait plus être considérée comme la vibration d'un milieu et ne transporterait aucune énergie : sa nature physique reste donc obscure. De plus cette onde entraînerait avec elle des corpuscules ayant chacun l'énergie $h\nu$ et leur imposerait un mouvement déterminé. L'énergie lumineuse ne se trouvant plus ainsi répandue dans l'onde, mais se trouvant concentrée dans les corpuscules, l'effet photo-électrique et le phénomène de Compton s'expliquent alors aisément. Mais comment rend-on compte des interférences ? Pour le comprendre, faisons une remarque pré-

liminaire. Il est nécessaire, pour pouvoir observer un phénomène d'interférences, d'employer une assez grande quantité d'énergie lumineuse, soit qu'on fasse, ce qui est le cas usuel, une observation rapide avec un faisceau intense de lumière, soit qu'on fasse une très longue observation, par exemple une longue pose photographique, avec un faible faisceau. De toutes façons, on peut se rendre compte qu'il n'est pas possible d'observer des interférences sans faire entrer en jeu un grand nombre de photons. Or, si nous considérons une onde lumineuse d'une couleur déterminée et l'ensemble des photons qu'elle traîne avec elle, on peut démontrer que le nombre des photons par unité de volume dans l'onde doit toujours être proportionnel à l'intensité de l'onde telle qu'elle était calculée par l'ancienne théorie ondulatoire. Donc, dans une région où se produisent des interférences, il passera beaucoup de photons là où l'ancienne théorie des ondes prévoyait un maximum de lumière, et il passera peu de photons là où l'ancienne théorie prévoyait un minimum de lumière. La répartition de l'énergie lumineuse dans les régions d'interférences sera donc avec la nouvelle théorie la même que celle que prévoyait la théorie classique, et cela bien que l'énergie lumineuse soit divisée en corpuscules au lieu d'être répandue d'une façon continue.

Par ces quelques explications vous pouvez entrevoir comment on cherche maintenant à concilier les résultats de la théorie des ondes avec l'hypothèse d'une structure granulaire des radiations. Le grand fait qui paraît maintenant bien établi, c'est que la lumière comporte à la fois des ondes et des corpuscules, ces ondes et ces corpuscules étant d'ailleurs intimement liés et formant, suivant une expression de M. Bohr « deux faces complémentaires de la réalité ».

Un fait récent d'une grande importance est venu confirmer la signification profonde de ce dualisme des ondes et des corpuscules. Je dois vous en dire quelques mots, bien que cela paraisse sortir un peu de mon sujet.

L'électron, petite charge électrique ponctuelle, est, nous l'avons vu, un des constituants essentiels de la matière. Jusqu'à une époque toute récente, on l'avait toujours considéré comme un simple corpuscule. Mais si, dans la nature, ondes et corpuscules sont indissolublement liés, ne doit-on à ces corpuscules-là aussi associer des ondes ? N'aurait-on pas commis pour l'électron l'erreur exactement inverse de celle qui fut commise en optique ? En d'autres termes, tandis qu'en optique Fresnel et ses conti-

nuateurs avaient trop négligé l'aspect corpusculaire pour ne s'attacher qu'à l'aspect des ondes, ne s'était-on pas trop attaché à l'aspect corpusculaire de l'électron en négligeant son aspect onde? Si l'on résout ces questions par l'affirmative, on est nécessairement amené à la conclusion suivante : on doit pouvoir, avec des faisceaux d'électrons, obtenir des phénomènes d'interférences analogues à ceux qu'on obtient avec des faisceaux de photons. Cette conclusion paraissait, il y a peu d'années, tout à fait insensée. Eh bien ! depuis deux ans, cette prévision hardie a été vérifiée : on a obtenu des phénomènes d'interférences avec des électrons, et on a pu mesurer la longueur d'onde de leur onde associée, qui s'est trouvée en accord avec les prédictions des nouvelles théories. Ainsi s'est trouvé ouvert tout un domaine nouveau de la physique expérimentale : la spectroscopie des électrons.

Ainsi donc le dualisme des ondes et des corpuscules dépasse le cadre de l'optique. On le retrouve pour la matière comme pour la lumière. C'est donc un des grands principes de la nature, peut-être son principe fondamental. Mais c'est aussi un de ses grands secrets car la véritable signification de ce dualisme paraît extrêmement difficile à bien comprendre.

Pour l'ignorant, un rayon de lumière c'est une chose bien simple et bien banale. Mais le savant, lui, peut se dire au contraire : « Nous saurions bien des choses si nous savions seulement ce qu'est un rayon de lumière. »

