Inv. n° 2900

PHYSIQUE PONCTUELLE
ET
PHYSIQUE DU CHAMP

La Physique théorique bénéficie de la puissance créatrice presque indéfinie de l'esprit humain dont elle procède, mais, par contre, elle ne peut s'affranchir entièrement ni de ses tendances instinctives, ni de ses imperfections. Or, l'une des tendances instinctives de notre esprit, qui est sans doute aussi l'une de ses imperfections, est de vouloir ramener la réalité à des abstractions nettement définies. En allant alternativement d'une de ces abstractions à l'abstraction opposée, il se trouve souvent ainsi ballotté indéfiniment entre des conceptions extrêmes et antinomiques. Cette circonstance, qui a toujours joué un grand rôle dans tous les domaines de l'activité humaine, s'exprime dans l'histoire des doctrines philosophiques et scientifiques par l'antagonisme et les succès alternés de la conception du simple-inétendu et de la conception antinomique du complexe-étendu. L'idée de l'élément indivisible et sans étendue, nous la retrouvons dans l'atome insécable de Démocrite et de Lucrèce, dans la monade de Leibniz, dans le corpuscule élémentaire des physiciens contemporains. Quant à l'idée opposée d'une réalité physique essentiellement étendue dans l'espace et nécessairement subdivisible, au moins par la pensée, nous la voyons suggérer toutes les représentations continues de la matière, toutes les théories qui invoquent l'existence d'un « milieu » siège des phénomènes; elle se retrouve dans l'éther d'Huyghens et de Fresnel parcouru par le frissonnement des ondes lumineuses; elle culmine enfin dans la conception maxwellienne du champ électro-

magnétique qui, répudiant toute action à distance, tend à représenter l'univers physique en décrivant l'état « local » à chaque instant de toutes les régions de l'espace. Ainsi se sont constitués, conformément aux tendances de notre esprit, deux grands courants de pensée opposés l'un à l'autre, qui se sont sans cesse rencontrés et plus ou moins mélangés dans les théories de la Physique moderne. Ils correspondent à deux points de vue antagonistes, qu'on peut appeler le point de vue de la « Physique ponctuelle » et celui de la « Physique du champ ». Nous voulons examiner dans cette étude comment ces deux points de vue se sont mêlés depuis un siècle dans les théories des physiciens, et comment ils se sont aujourd'hui conciliés dans les conceptions quantiques d'une manière très intéressante, qui est de nature à nous faire mieux comprendre leurs situations respectives.

*
* *

La théorie physique qui a été constituée la première et qui a servi, peut-on dire, de modèle aux autres pendant plus de deux siècles, est la Mécanique newtonienne, la Mécanique rationnelle classique. Par son point de départ et par ses tendances elle appartient à la Physique ponctuelle. Elle part en effet de l'idée de point matériel, c'est-à-dire de corpuscule sans étendue, mais doué de masse, et elle en tire les notions de trajectoire et de vitesse. Sans doute la Mécanique a pu décrire les mouvements des corps étendus, mais c'est essentiellement en les considérant comme des ensembles de points matériels. Dans la Mécanique des milieux continus, dans la théorie de l'Élasticité et dans la Mécanique des fluides, l'idée primitive du point matériel a passé au second plan et la doctrine s'est infléchie dans le sens de la Physique du champ. Néanmoins, l'apparente continuité des milieux solides ou fluides est considérée dans ces théories comme due à une sorte d'illusion macroscopique, qui voile pour nos sens trop grossiers la structure discontinue des milieux matériels. Le caractère essentiellement discontinu et ponctuel de la Mécanique newtonienne a d'ailleurs reparu avec toute sa force dans les théories de la physique le jour où les physiciens, ayant découvert l'existence des corpuscules élémentaires, ont cherché à expli-

quer les propriétés physiques et chimiques des corps par les mouvements et les interactions de ces corpuscules.

Il est à noter que la grosse difficulté rencontrée par les conceptions ponctuelles de la Mécanique, c'est précisément l'existence des interactions. Entre des corpuscules vraiment ponctuels et isolés, les forces d'interaction ne peuvent résulter que d'actions à distance dans l'espace vide, et l'on retrouve la même conception, difficilement acceptable, à une plus grande échelle en Mécanique céleste, où elle a soulevé dès le temps de Newton de fortes objections. Tandis donc que la conception ponctuelle de la Mécanique conduit à une représentation nette au sujet du mouvement et de la trajectoire des éléments matériels et satisfait notre tendance à admettre l'existence d'individualités physiques primaires et irréductibles, elle se heurte à d'importantes difficultés pour la représentation des actions entre les corpuscules élémentaires, l'espace qui sépare ces corpuscules devant être absolument vide et sans contenu physique, et ne pouvant par suite servir de support ou d'agent transmetteur pour les interactions.

Ces difficultés rencontrées par la conception purement ponctuelle de la Mécanique ont conduit à rechercher des formes plus continues de cette science, telles que la théorie de l'élasticité des solides ou la Mécanique des fluides, dans lesquelles on attribue à chaque élément de volume du solide ou du fluide considéré des grandeurs de nature cinématique ou dynamique (vitesse, accélération, quantité de mouvement, énergie, tensions ou pressions internes,... etc.). Il est intéressant de rappeler ici la façon dont ces représentations continues ont pu se concilier avec la croyance à une structure discontinue de la matière. Considérons, par exemple, la notion de densité, qui intervient constamment dans ces représentations continues. Dans un fluide homogène de densité ρ, un petit élément de volume Δv aura une masse $\rho \Delta v$: si l'on adopte l'hypothèse d'une structure discontinue de la matière, cela ne veut pas dire que l'élément de volume Δv examiné microscopiquement soit rempli d'un fluide de densité ρ, car, par hypothèse, cet élément de volume contient en réalité des corpuscules de matière séparés par du vide. La densité réelle à l'intérieur de Δv est donc très grande (peut-être même infinie) en certains points, tandis qu'elle est nulle presque partout. La possibilité d'employer la notion d'une densité macroscopique ρ vient de ce

que les éléments Δv envisagés par la Mécanique continue sont des « infiniment petits physiques » et contiennent chacun un nombre énorme de particules matérielles. La quantité $\rho\Delta v$ représente ainsi le produit par la masse de chacune des particules du nombre probable des particules contenues dans l'élément de volume Δv, l'écart relatif entre le nombre réel et le nombre probable de ces particules devant toujours être pratiquement très petit en vertu de la loi des grands nombres. On voit donc que c'est l'intervention des considérations statistiques qui seule, en réalité, permet aux formes continues de la Mécanique d'admettre une continuité apparente à l'échelle macroscopique et de satisfaire ainsi à cette échelle aux tendances de la Physique du champ. Mais il faut remarquer que les difficultés signalées précédemment sont ainsi seulement reculées, repoussées à l'échelle inférieure, mais non pas résolues. Tant qu'on examine ces phénomènes avec des moyens assez grossiers pour que les éléments Δv paraissent comme infiniment petits, on obtient une Physique du champ douant chaque élément du volume Δv de propriétés mécaniques ou physiques et supprimant l'action à distance. Mais, si l'on parvient à analyser ce qui se trouve réellement dans chaque élément de volume Δv, on est amené à s'y figurer des corpuscules séparés par d'immenses espaces vides (immenses par rapport aux dimensions des corpuscules) et ne pouvant agir les uns sur les autres que pour des actions à distance. Les antinomies, que le jeu des moyennes statistiques faisait disparaître ou masquait à l'échelle grossière de nos observations macroscopiques, reparaissent dans toute leur vigueur quand on pousse plus loin l'analyse de la réalité physique. Aussi, ceux que scandalisait l'idée d'action à distance et d'isolement des points matériels au milieu d'un vide dénué de propriétés physiques devaient-ils en arriver logiquement à tenter de construire une véritable Physique du champ, qui attribue à chaque élément de volume, si petit soit-il, à l'échelle microscopique des propriétés mécaniques et physiques, tirant ainsi les corpuscules de leur splendide isolement et éliminant toute action à distance. Cette véritable « Physique du champ » fut l'œuvre capitale de Maxwell et de ses continuateurs, notamment de Lorentz.

Une des caractéristiques bien connues de la théorie électromagnétique de Maxwell est, en effet, de douer chaque élément de

volume, même du vide, de propriétés physiques essentiellement représentées par le *tenseur de Maxwell*, qui exprime l'énergie, la quantité de mouvement et les tensions électromagnétiques localisées par unité de volume en chaque point. Le vide, du moins lorsqu'il est le siège d'un champ électromagnétique, cesse ainsi d'être un cadre amorphe et devient le support d'une distribution continue de grandeurs électromagnétiques. Ce point de vue a été ensuite précisé et développé par Lorentz dans sa célèbre théorie des électrons. Cette théorie admet que les corps matériels sont formés en dernière analyse de particules électrisées et, prolongeant dans le microscopique les conceptions macroscopiques de Maxwell, elle suppose qu'à l'intérieur des corps matériels le tenseur de Maxwell (exprimé à l'aide des champs définis par Lorentz) donne, pour chaque élément de volume du vide qui sépare les particules électrisées, l'énergie, la quantité de mouvement et les tensions électromagnétiques localisées dans cet élément de volume. On arrive ainsi à une Physique du champ qui régnerait, même à l'échelle la plus fine, dans toutes les régions qui, au sein de la matière, seraient extérieures aux particules électrisées. Pour les partisans du continu et des actions médiates, il y avait là un grand progrès et les difficultés paraissaient ainsi considérablement réduites. Elles n'étaient cependant encore que reculées, car elles se reposaient pour l'intérieur des particules électrisées. On pouvait imaginer les particules électrisées comme de petits objets ayant une certaine extension spatiale et contenant une certaine distribution d'électricité d'un seul signe, et tenter d'appliquer à l'intérieur même de cette distribution les conceptions de la Physique du champ. Ce fut la voie suivie par Lorentz. Mais il fallait alors expliquer pourquoi les particules électrisées sont stables malgré la répulsion mutuelle de leurs parties; il fallait aussi expliquer pourquoi ces particules, par exemple les électrons négatifs, sont insécables et jouent le rôle de constituants élémentaires de la matière, pourquoi il en existe un très petit nombre de types, chaque type étant tiré à un nombre immense d'exemplaires dans la nature. A toutes ces questions la théorie de Lorentz n'a pu fournir aucune réponse satisfaisante. On pourrait, il est vrai, s'en tirer d'une autre manière, en admettant que les particules élémentaires sont ponctuelles, inétendues, que ce sont des singularités du champ électromagnétique, de sorte que la Physique du

champ serait valable partout sauf en un certain nombre de points singuliers. On réaliserait ainsi une sorte de synthèse entre la Physique du champ et la Physique ponctuelle. Malheureusement, avec les conceptions de l'électromagnétisme classique, cette tentative se heurte aussi à d'insurmontables objections. En particulier, une charge électrique rigoureusement ponctuelle devrait, du seul fait de l'existence de son champ électro-statique, posséder une énergie infinie, conclusion physiquement inacceptable.

Ainsi, au moment où se terminait, dans les premières années du XX^e^ siècle, la période classique de la physique (c'est-à-dire la période antérieure au développement de la théorie des quanta), on se trouvait dans la situation suivante : d'une part, la Physique du champ était parvenue à donner une représentation des champs électromagnétiques qui paraissait valable même à l'échelle microscopique dans le vide et dans les interstices de la matière, c'est-à-dire dans les espaces qui, à l'intérieur de la matière, séparent les particules électrisées; d'autre part, l'existence de corpuscules élémentaires électrisés jouant le rôle de matériaux ultimes des édifices matériels, c'est-à-dire la structure discontinue de la matière et de l'électricité, avait été établie expérimentalement d'une façon certaine; mais il restait impossible de concilier d'une manière satisfaisante l'existence de ces grains élémentaires de matière et d'électricité avec les exigences de la Physique du champ.

Cette situation s'est trouvée encore singulièrement aggravée par la découverte d'une structure discontinue de la lumière, qui entraîne (car il est impossible de renoncer à la grande synthèse de Maxwell) l'existence d'un aspect granulaire de l'énergie électromagnétique elle-même. Tous les succès de la Physique du champ réalisés par l'œuvre des Maxwell et des Lorentz se sont trouvés remis en question. Jusque-là, on avait pu légitimement penser que la structure granulaire était quelque chose de spécial à la matière et à l'électricité, tandis que la répartition de l'énergie électromagnétique dans le vide paraissait correctement représentée par le tenseur de Maxwell dans chaque élément de volume où règne le champ considéré. Et voilà que la découverte du quantum de lumière, du photon, montrait que la répartition continue des énergies et quantités de mouvement électromagnétiques donnée par le tenseur de Maxwell ne pouvait être, elle aussi, que la représentation statistique d'une structure granulaire jusqu'alors

inconnue. La théorie de Maxwell-Lorentz n'apparaissait plus que comme une image globale permettant de représenter en moyenne dans un grand nombre de cas les propriétés de l'énergie électromagnétique, mais masquant la nature réelle, essentiellement discontinue, de cette énergie : tout comme la Mécanique des fluides permet de représenter globalement dans beaucoup de cas les propriétés moyennes des corps fluides, mais en masquant la structure atomique de la matière. Cette découverte avait des conséquences particulièrement graves, car elle annulait tous les succès remportés par la Physique du champ à l'échelle microscopique, sous la forme de la théorie de Lorentz. Dans cette théorie, en effet, on représentait la distribution des énergies et quantités de mouvement électromagnétiques à l'aide du tenseur de Maxwell (exprimé avec les champs microscopiques de Lorentz), même à l'intérieur de la matière entre les particules électrisées, de sorte que la Physique du champ paraissait régner au moins dans tout l'espace extérieur aux particules électrisées : or on s'apercevait tout à coup qu'il ne pouvait s'agir encore ici que d'une statistique, comme dans la Mécanique des fluides macroscopiques, et non d'une véritable et définitive Physique du champ. Mais la question s'est trouvée bientôt complètement renouvelée par le développement des théories quantiques dont nous allons maintenant parler.

*
* *

Le résultat essentiel des théories quantiques, si on les examine du point de vue qui nous occupe, est le suivant : elles ont introduit les idées de probabilité et de statistique dans le cas d'une *seule* particule élémentaire. Ce faisant, elles nous ont fait entrevoir la possibilité d'une fusion plus complète et très nouvelle entre les conceptions de la Physique ponctuelle et celles de la Physique du champ. Les théories quantiques admettent l'existence de corpuscules élémentaires ponctuels qui se manifeste dans les faits observables par des apparences à caractère discontinu. Mais elles ont été aussi forcées d'admettre que ces corpuscules élémentaires ne sont pas bien localisés dans l'espace à chaque instant, qu'il existe en général toute une région étendue de l'espace où la présence du corpuscule *peut* se manifester. De

même, les grandeurs dynamiques d'un corpuscule, énergie et quantité de mouvement, sont susceptibles de se manifester à nous dans les observations avec des valeurs bien définies, mais, à chaque instant, il y a en général toute une série de valeurs possibles pour ces grandeurs, de sorte que le point représentatif du corpuscule dans l'extension en moment [1] n'est pas, lui non plus, bien localisé, et qu'il existe en général à chaque instant toute une région étendue de cette extension en moment où la présence du point représentatif de la quantité de mouvement peut se manifester. Les étendues des deux régions de localisation possible dans l'espace des positions et dans l'espace des moments sont d'ailleurs reliées par les relations d'incertitude d'Heisenberg, de telle façon que, si l'une est petite, l'autre est nécessairement grande. La théorie quantique, notamment sous la forme de la Mécanique ondulatoire, associe alors au corpuscule ponctuel des fonctions continues représentant la distribution des probabilités de présence dans l'espace et définissant pour chaque grandeur mécanique une densité de répartition.

Bref, la théorie quantique en est arrivée à ce résultat très intéressant d'associer à chaque corpuscule, malgré sa nature foncièrement ponctuelle, des grandeurs réparties continûment dans l'espace, qui représentent les probabilités des manifestations discontinues du corpuscule. Ainsi se trouvent réconciliées sous une forme assez inattendue la Physique ponctuelle et la Physique du champ, la seconde apparaissant maintenant comme une représentation statistique des diverses possibilités.

On peut même aller plus loin. La Physique du champ est liée à l'emploi de l'espace continu à trois dimensions comme cadre de la réalité physique, tandis que la Physique ponctuelle suggérerait plutôt l'idée d'un espace discontinu et granulaire. Dans la Physique des quanta les deux notions se rapprochent, parce qu'à chaque grain est liée une marge d'incertitude et que, si les grains sont assez voisins pour que les marges d'incertitude empiètent, il en résulte un continu apparent, dû à la mauvaise définition des éléments discontinus qui le sous-tendent. De la même manière, en spectroscopie, un fond spectral continu peut être engendré par une accumulation de raies spectrales, car

1. L'extension en moment est l'espace abstrait où sont représentées les quantités de mouvement.

chaque raie spectrale ayant toujours une largeur, quand les raies sont assez serrées pour que la distance de leurs centres soit inférieure à leur largeur, l'accumulation des raies discontinues donne l'apparence d'un fond continu due à la définition imprécise des raies discontinues qui le forment. Et cette comparaison n'est pas superficielle, car, en théorie quantique, la largeur d'une raie spectrale est la traduction de l'incertitude (au sens d'Heisenberg) qui existe sur la valeur exacte de sa fréquence, de sorte que le fond spectral continu est bien alors une apparence engendrée par l'incertitude, au sens quantique du mot, dont sont affectés les éléments discrets qui le composent. Cette idée du discontinu engendrant le continu par l'incertitude mériterait certainement d'être approfondie.

* * *

Dans les formes continues de la Mécanique macroscopique, les grandeurs de champ (telles que les densités, les vitesses d'écoulement, etc.) s'introduisent en somme par suite d'une statistique portant sur un nombre immense de particules, statistique justifiée par le caractère grossier et global de nos observations macroscopiques. En Physique quantique, au contraire, les grandeurs de champ s'introduisent par une statistique portant sur les possibilités relatives à un seul corpuscule, et sont par par suite rattachées aux « incertitudes » caractéristiques de cette nouvelle Physique. La Mécanique ondulatoire définit les grandeurs de champ associées à un corpuscule à l'aide d'une fonction continue des coordonnées et du temps, la « fonction d'onde Ψ » du corpuscule. Cette fonction d'onde, étant définie en chaque point de l'espace à chaque instant, présente elle-même les caractères d'une grandeur de champ : aussi l'appelle-t-on parfois le champ Ψ (Ψ-*Feld* des auteurs allemands). Mais ce champ Ψ n'a pas en lui-même un caractère physique correspondant à des faits observables : ce sont d'autres grandeurs de champ construites à partir du champ Ψ qui ont ce caractère. Ainsi, dans la Mécanique ondulatoire relativiste des électrons à spin, due à M. Dirac, on peut construire toute une série de grandeurs de champ (densités de moment magnétique et de moment élec-

trique propres de l'électron, densité de spin, etc.) à partir du champ Ψ, qui, d'ailleurs, est ici défini par un ensemble de quatre fonctions formant les composantes d'un même être mathématique. Ces grandeurs jouent dans cette théorie de Dirac un rôle très important : ce sont elles en particulier qui y présentent des variances relativistes simples.

Nous venons de voir comment la Mécanique ondulatoire des particules matérielles définit les grandeurs de champ associées à une de ces particules. Comment peut-on étendre cette méthode au cas de la lumière? Une bonne théorie de la lumière doit aujourd'hui rendre compte à la fois de l'existence des photons et de la représentation de l'onde lumineuse par les champs électromagnétiques de Maxwell. Il semble donc bien que, dans une telle théorie, l'on doive poser en principe au départ l'existence de la particule « photon », et chercher à lui associer un champ Ψ permettant de construire des grandeurs de champ parmi lesquelles on retrouve les grandeurs électromagnétiques classiques de l'onde lumineuse maxwellienne. C'est ce programme que l'auteur du présent article s'est efforcé de remplir par sa nouvelle théorie du photon. Cette théorie constitue une véritable Mécanique ondulatoire du photon, et les résultats qu'elle a pu obtenir paraissent aujourd'hui très satisfaisants à beaucoup d'égards. De toutes façons, et quelle que soit la manière dont on la développe, la théorie du photon apparaît presque nécessairement comme le point critique où les conceptions de la Physique ponctuelle représentées par la notion même de photon doivent venir rejoindre la plus parfaite des théories de la Physique du champ, la théorie électromagnétique : là est la raison profonde de l'intérêt tout particulier que présente l'étude théorique de la lumière dans le stade actuel de la Physique.

*
* *

Il paraît impossible de ne pas dire maintenant quelques mots d'une question, à vrai dire très difficile, qui a joué un rôle important dans le développement des théories quantiques contemporaines : celle de la « superquantification » ou « seconde quantification ».

Quand on a affaire, non pas à une seule particule, mais à un ensemble de particules, la construction des champs associés à cet ensemble se fait en Mécanique ondulatoire d'une façon assez inattendue. On doit, en effet, associer à cet ensemble de particules, non plus une fonction Ψ représentant une onde qui se propage dans l'espace physique ordinaire à trois dimensions, mais bien une fonction Ψ représentant une onde qui se propage dans un espace abstrait, dit espace de configuration, ayant autant de fois trois dimensions qu'il y a de particules dans le système. Ainsi, pour un système contenant N particules, la fonction d'onde et toutes les grandeurs de champ qui en dérivent sont définies dans un espace fictif à 3N dimensions. De plus, si le système contient plusieurs particules de même nature physique (plusieurs électrons ou plusieurs protons, par exemple), la fonction Ψ doit satisfaire, suivant la nature de ses particules, à certaines conditions de symétrie ou d'antisymétrie bien connues de ceux qui ont étudié la Mécanique ondulatoire.

Le progrès des méthodes de la Mécanique ondulatoire a montré que, quand l'on étudie un ensemble de N particules *de même nature physique*, il est possible de représenter l'évolution de tout cet ensemble à l'aide d'une onde se propageant dans l'espace à trois dimensions. On obtient alors ainsi une description ondulatoire du système formé par les N particules identiques dans le cadre de l'espace physique auquel nous sommes accoutumés et qui nous est presque indispensable pour exprimer notre connaissance du monde extérieur. Et ce procédé nous permet d'associer à l'ensemble de particules considéré certaines grandeurs définies en chaque point de l'espace physique à chaque instant, ce qui nous ramène aux procédés habituels de la Physique du champ. Mais la fonction $\Psi(x, y, z, t)$, qui représente l'onde du système des N particules dans l'espace physique à trois dimensions, ne peut plus avoir le même caractère que la fonction Ψ associée au mouvement d'un seul corpuscule. Il doit, en effet, y avoir dans sa structure mathématique quelque chose qui traduise l'existence de N particules dans le système considéré, et N doit naturellement être un nombre entier. Que le nombre N doive être un entier, c'est là la traduction même de la notion de particule, c'est l'exigence fondamentale de la Physique ponctuelle. Or, la découverte de la méthode dite « superquantification » ou « seconde quanti-

fication » a permis à la Mécanique ondulatoire d'attribuer à la fonction d'onde $\Psi(x, y, z, t)$ les propriétés nécessaires pour que le caractère entier du nombre N se trouve traduit automatiquement par le formalisme même de la théorie. En définissant convenablement le champ Ψ superquantifié et les grandeurs qui en dérivent à l'aide de fonctions continues dans l'espace physique à trois dimensions, la méthode de seconde quantification parvient à associer ces champs continus à des nombres nécessairement toujours entiers de particules : par là elle réalise sous une forme entièrement nouvelle la fusion des concepts de la Physique du champ avec ceux de la Physique ponctuelle.

Il faut avouer cependant que, si la superquantification concilie très élégamment la continuité du champ Ψ avec la notion de particules discrètes, elle n'y parvient qu'au moyen d'un artifice de caractère assez abstrait : la fonction d'onde $\Psi(x, y, z, t)$ n'est plus, en Mécanique ondulatoire superquantifiée, une fonction ordinaire ayant une valeur numérique bien définie pour chaque valeur des variables x, y, z, t ; c'est ce que l'on nomme un « opérateur », fonction de x, y, z, t. La seconde quantification déplace donc en quelque sorte le caractère étrange de la Mécanique ondulatoire des systèmes de particules sans parvenir à l'éliminer. Dans la forme ordinaire, non superquantifiée, de cette Mécanique ondulatoire, on a des grandeurs de champ qui sont des fonctions numériques ordinaires, mais, au lieu de définir des champs dans l'espace physique à trois dimensions, on définit des champs dans un espace visiblement fictif à 3N dimensions. Dans la Mécanique ondulatoire superquantifiée, au contraire, nous retrouvons avec soulagement notre espace physique habituel à trois dimensions, mais, en revanche, la fonction Ψ et les grandeurs de champ qui en dérivent ne s'expriment plus par des fonctions numériques ordinaires, mais par des opérateurs. Ainsi, ce que la représentation intuitive a gagné d'un côté, elle le reperd de l'autre ; cela n'empêche d'ailleurs en rien la seconde quantification d'être une méthode logiquement cohérente.

Il est intéressant de préciser comment la seconde quantification s'introduit dans la théorie des particules de lumière. Lorsqu'on est parvenu à construire une Mécanique ondulatoire du photon, il est naturel de considérer des assemblées de nombreux photons, car c'est le cas qui se présente habituellemen en pratique.

Pour représenter un ensemble de N photons dans le cadre de l'espace physique, il sera alors tout indiqué de soumettre la Mécanique ondulatoire du photon à l'opération de seconde quantification. Le champ Ψ du photon ayant été transformé par cette opération, toutes les grandeurs attachées au photon qui se construisent à partir du champ Ψ, et, en particulier, les grandeurs électromagnétiques maxwelliennes, se trouveront automatiquement transformées elles aussi. Les champs électromagnétiques liés à l'ensemble des photons se trouvent alors avoir acquis précisément le caractère quantifié que leur avaient attribué, il y a déjà une dizaine d'années, MM. Jordan, Pauli et Heisenberg dans leur théorie quantique des champs. Les formules par lesquelles s'exprime le caractère quantifié des champs électromagnétiques traduisent le fait que les champs maxwelliens, malgré leur aspect de champs continus, correspondent toujours à des nombres entiers de photons. La Mécanique ondulatoire du photon, une fois superquantifiée, aboutit donc à la théorie quantique des champs et explique comment la lumière peut être représentée à la fois par une assemblée de photons et par un champ électromagnétique du type de Maxwell.

* * *

Dans les lignes qui précèdent, nous espérons avoir montré que la Mécanique ondulatoire et ses prolongements ont apporté des éléments vraiment nouveaux dans la vieille lutte entre la Physique ponctuelle et la Physique du champ, entre la conception continue et la conception discontinue des réalités physiques ultimes. Les éléments derniers de la matière et de la lumière y sont conçus comme étant des corpuscules essentiellement ponctuels. Les coordonnées de ces corpuscules et les grandeurs dynamiques qui leur sont attachées sont susceptibles de se révéler à nous dans les observations avec des valeurs tout à fait précises. Mais l'ensemble des valeurs des coordonnées et des grandeurs dynamiques est constamment affecté par les incertitudes quantiques liées à l'existence du quantum d'Action. Ce sont ces incertitudes qui nécessitent pour leur représentation statistique l'emploi des grandeurs de champ, de sorte que le continu apparaît ici comme sor-

tant du discontinu par l'intermédiaire des incertitudes quantiques dont l'existence rend nécessaire l'intervention des probabilités et du point de vue statistique. Réconciliation du continu avec le discontinu par le jeu des probabilités, le continu semblant surgir de l'application des probabilités à un discontinu incertain, telle paraît être la suggestion que nous fournit l'état actuel des théories quantiques.

LOUIS DE BROGLIE.