

# SCIENCES

1960-13

Tirage à part

revue française des sciences et des techniques

numéro 6

mars-avril 1960

# Harmonie préétablie de la relativité restreinte et des quanta\*

*Nées l'une et l'autre vers 1900 de problèmes d'optique (émission-absorption des ondes d'une part, propagation des ondes de l'autre), la théorie des quanta et la relativité restreinte sont essentiellement deux théories sœurs, comme le proclama la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie en 1925. Il fallut pourtant attendre presque jusqu'à 1950 pour voir se constituer la Théorie quantique des champs sous forme explicitement relativiste. L'on cherche ici à montrer quels incidents de croissance, les uns techniques, les autres épistémologiques, étaient survenus, et quels remèdes ont été apportés.*

Les jeunes théoriciens d'aujourd'hui, frais émoulus du cours d'électrodynamique quantique, ont peine à croire que durant deux décades quelques savants très illustres aient mis en doute la possibilité de réconcilier harmonieusement, à la base, les deux grandes théories de la relativité restreinte et des quanta. Qu'en vérité le paradoxal « conflit de la relativité restreinte et des quanta » n'ait jamais été qu'un déplorable malentendu, c'est ce que l'épistémologie sait apercevoir on ne peut plus nettement.

Contrainte à devenir relativiste après la cinématique, la dynamique avait fait une surprenante découverte : celle de la présence et du rôle de la constante « optique » dans son propre domaine. C'est la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie qui a révélé la signification profonde de ce fait : il exprime l'existence des ondes matérielles. Et, dans un de ces retournements spectaculaires, dont l'histoire de la physique offre quelques exemples, la dynamique, qui avait suivi par force la cinématique dans son alliance einsteinienne avec l'optique du vide, se transforme avec Louis de Broglie en une optique généralisée contenant l'optique proprement dite comme un cas particulier. En corollaire, l'électrodynamique doit quitter le rôle de favorite suprême où Einstein et Minkowski l'avaient installée : la théorie générale des champs quantifiés qui est en train de s'élaborer (non sans difficultés il est vrai, mais à peu près certainement sans difficultés d'origine relativiste\*\*) ramène l'électrodynamique à sa place traditionnelle d'exemple et de cas particulier de la mécanique générale, aujourd'hui « ondulatoire » et « quantifiée ».

Tout au plus peut-on dire que l'électrodynamique, en tant que mécanique ondulatoire d'un corpuscule de masse propre nulle, le photon, a le privilège de se placer d'emblée dans le cas limite où tous les raisonnements se simplifient avec une paradoxale brièveté. Il n'en est pas moins vrai qu'aujourd'hui toute l'argumentation sur laquelle Einstein et Minkowski ont fondé la théorie de la relativité restreinte pourrait être reprise dans le cadre plus général des « ondes matérielles » de Louis de Broglie : il n'y faudrait que quelques précautions de langage touchant les vitesses de groupe et les vitesses limites.

Dans les années même (Einstein, 1905; Minkowski, 1908) où la relativité restreinte naissait des problèmes de la propagation des ondes lumineuses, la théorie des quanta, quant à elle, naissait des problèmes de l'émission et de l'absorption des ondes lumineuses (Planck, 1900; photon d'Einstein,

\* Cette étude introduit à un ouvrage en préparation : « La grandeur physique Temps ».

\*\* Nous maintenons cette opinion compte tenu de la difficulté de convergence très radicale signalée par Haag, Greenberg, Wightmann en théorie des champs quantifiés.

1905; Bohr, 1912); et la toute nouvelle constante universelle  $h$  venait prendre place au même rang primordial où Einstein avait installé la constante  $c$ .

Ici encore, c'est la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie qui rétablit une juste perspective. Dans « l'ancienne théorie des quanta » la quantification des mouvements matériels et celle des propagations d'ondes lumineuses se faisaient de manières complètement différentes. La quantification des mouvements mécaniques, c'était la quantification de l'action (ou du moment angulaire) selon les règles de Planck et de Bohr. Et la quantification des ondes lumineuses, c'était l'introduction des *lichtquanten* d'Einstein, aujourd'hui appelés *photons*. Le trait de génie de Louis de Broglie fut de discerner un phénomène de résonance ondulatoire dans la quantification des mouvements matériels, d'introduire les *ondes matérielles* au cœur de la mécanique comme Einstein avait réintroduit les *points matériels* au cœur de l'optique, et de poser ainsi la base de cette théorie unitaire générale de la matière et du rayonnement, des ondes et des particules, qui est en train de s'édifier sous le nom de théorie des champs quantifiés. Ayant identifié les concepts mécaniques d'action et d'impulsion-énergie aux concepts optiques de phase et de quadrifréquence, Louis de Broglie identifie en particulier les niveaux quantifiés d'énergie de l'atome à des fréquences de résonance. L'espace-temps de Minkowski apparaît ainsi comme le champ où se superposent et interagissent des myriades d'ondes matérielles quantifiées.

Vraiment, lorsque l'épistémologue revit ces pages d'histoire, il ne peut résister à cette évidence multipliée que, quasi contemporaines et nées l'une et l'autre d'un problème d'optique (optique cinématique d'une part, micro-optique de l'émission-absorption de l'autre), la relativité restreinte et la théorie des quanta sont deux sœurs siamoises qu'on ne saurait séparer sans déchirante violence. Telles elles se reconnurent en 1925 dans la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie, et telles elles se retrouvèrent, un peu avant 1950, avec l'avènement de l'électrodynamique quantique explicitement relativiste des Tomonaga, Schwinger, Dyson, Feynman. Notons au passage ce relais de témoin de Minkowski aux créateurs de la nouvelle forme de la théorie des champs, ce rôle de vedette où reparait l'électrodynamique.

Et quant à sa forme, la théorie des champs quantifiés selon Tomonaga, Schwinger, Dyson, Feynman est un monument de géométrie quadridimensionnelle du style minkowskien le plus pur. C'est aussi un monument partout frappé à l'écusson des constantes  $c$  et  $h$  entrelacées, que le déroulement des équations répète inlassablement.

Comment, si les choses sont ainsi, le « conflit de la relativité restreinte et des quanta », de triste mémoire, a-t-il pu faire parler de lui pendant les quelque vingt ans ayant séparé la Mécanique ondulatoire de Louis de Broglie de la théorie des champs quantifiés sous sa forme explicitement relativiste?

## LES ANNÉES DU « CONFLIT » DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE ET DES QUANTA

L'on sait que le formalisme mathématique de la « nouvelle théorie des quanta » des années 1925 s'est défini par la rencontre des travaux de Heisenberg et de Schrödinger; techniquement parlant, c'est une application de la théorie de l'espace fonctionnel de Hilbert et des opérateurs qu'on y définit. Ce formalisme, de toute nécessité physique, devait intégrer les ultimes acquisitions de « l'ancienne théorie des quanta » parvenant à son terme : la théorie du moment angulaire interne, ou *spin* des particules élémentaires (Uhlenbeck et Goudsmit, 1925), l'existence des nouvelles (et très surprenantes) statistiques de ces particules, celle de Bose-Einstein et celle de Pauli-Fermi-Dirac (1924-1926), enfin la relation entre spin et statistique, les *fermions* ayant un spin demi-entier et les *bosons* un spin entier ou nul (en unités  $h/2\pi$ ). Tout ceci, sur le plan technique, fut vivement accompli : théorie de l'électron à spin non relativiste (Pauli), puis relativiste (Dirac, 1927); théorie du photon de spin 1 (L. de Broglie 1934-1936) et théories générales des particules à spin; « superquantification » des ondes de bosons par Dirac et par Fock, des ondes de fermions par Jordan et Wigner (1927-1928).

La théorie générale des ondes à spin représente un aspect très intéressant de la synthèse entre relativité restreinte et quanta, sur lequel nous ne voulons pas nous étendre ici : les divers types possibles

d'ondes à spin illustrent, au sens de la théorie des groupes, les diverses représentations linéaires irréductibles du groupe des rotations de l'espace-temps, ou groupe de Lorentz-Poincaré.

La *superquantification* des ondes matérielles exprime que le nombre des corpuscules portés par une onde donnée est essentiellement positif ou nul, et, ceci, avec les caractères si nouveaux respectivement découverts par Pauli et par Bose (1924) : le *fermion*, pourrait-on dire, est un égocentriste qui ne tolère pas le partage de sa place, en sorte que le *nombre d'occupation* de son onde est 1 ou 0; le *boson*, au contraire, aime le coude à coude, et les formules de sa statistique traduisent bien sa tendance naturelle à l'association. Les propriétés des assemblées de particules élémentaires sont donc bien éloignées de celles des particules mutuellement indifférentes de la statistique classique; et l'on peut soupçonner par là qu'en fin de compte il ne s'agit pas réellement de particules, mais plutôt de lois d'excitation physique de deux grandes classes d'ondes. Adoptant une attitude strictement phénoménologique, nous nous abstenons dorénavant de penser aux termes de *particules* pour ne plus raisonner qu'en termes de *nombres d'occupation*.

C'est ce que n'a pas fait, dans les années 1926, la *doctrine de la complémentarité* de l'École de Copenhague (qui représente, on le sait, la première épistémologie systématique de la théorie des quanta). Il nous paraît que cette ignorance de fait de la doctrine de la complémentarité à l'égard du formalisme et des conceptions de la théorie superquantifiée, sa contemporaine, représente l'un des deux accidents majeurs d'où est issu le fâcheux « conflit de la relativité restreinte et des quanta ». En effet, les deux concepts d'onde, et de *nombre d'occupation* d'une onde, sont explicitement relativistes; ils se prêtent à l'emploi d'un discours minkowskien. La *superquantification*, comme le *spin*, représentait un élément essentiel de la synthèse relativité-quanta; les deux omissions de la doctrine de la complémentarité, sous sa forme initiale, d'avoir ignoré la superquantification, et d'avoir ignoré le langage quadridimensionnel de Minkowski, sont en fait solidaires.

Malgré tout, ce n'est pas là que réside l'origine principale du conflit (aujourd'hui effacé) de la relativité restreinte et des quanta : c'est dans un grave accident technique aux lourdes conséquences.

Alors que la mécanique ondulatoire de la thèse de Louis de Broglie était à la fois explicitement relativiste et explicitement quantique, les deux formalismes (par ailleurs si brillamment novateurs) de Heisenberg et de Schrödinger retombèrent, en ce qui concerne le traitement des variables canoniquement conjuguées *temps* et *énergie*, dans le schème périmé des conceptions newtoniennes. Les fâcheuses dissymétries du formalisme entre temps et coordonnées d'espace, entre énergie et composantes de l'impulsion, apparaissaient à plein dans l'appareil de la théorie quantique des champs, et notamment dans la technique, vingt ans classique, de la « variation des constantes » de Dirac.

Il est possible de montrer en détail qu'en rectifiant *a posteriori* le cours de cette histoire par l'exigence de la double covariance relativiste, et du formalisme, et du discours interprétatif, le conflit de la relativité restreinte et des quanta s'efface comme par enchantement et que, par surcroît, bien des pseudo-paradoxes et bien des difficultés conceptuelles disparaissent aussi.

#### COVARIANCE RELATIVISTE (RESTREINTE) DANS LE FORMALISME QUANTIQUE

Nous serons par force très bref sur les aspects techniques des solutions apportées aux problèmes posés. La directive d'ordre physique est évidemment de tout penser en termes d'ondes : leur propagation, leur émission, leur absorption. Ainsi les exigences conjointes de la relativité restreinte et des quanta seront-elles explicitement maintenues au premier plan.

Nous avons dit qu'à la suite des travaux de Heisenberg et de Schrödinger l'instrument mathématique essentiel de la théorie des quanta est la théorie de l'espace fonctionnel de Hilbert. La pierre angulaire en est la définition de la métrique caractérisant cet espace, elle-même incluse dans la définition du *produit scalaire hermitien* de deux éléments ou *vecteurs* de cet espace. Cette définition, dans la version prérelativiste de la théorie, était liée à l'écriture d'une certaine intégrale portant

sur les variables d'espace du système mécanique; c'est manifestement cette intégrale qu'il faut réussir à définir d'une manière invariante, au sens de la géométrie quadridimensionnelle de Minkowski. L'on y parvient tout naturellement 1° en restreignant le contenu de l'espace hilbertien aux solutions de l'équation d'ondes (qui est par hypothèse invariante relativiste), 2° en transposant le schème de définition de cette grandeur *invariante relativiste* et *conservative* qu'est la charge électrique. Compte tenu de l'existence d'une densité de courant conservative à quatre composantes liée à l'équation d'ondes, on peut définir le produit scalaire hermitien de deux ondes solutions au moyen d'une intégrale triple invariante relativiste et conservative attachée à une hypersurface arbitraire du genre espace. Ceci, pour l'onde libre de spin non spécifié, pour l'onde libre à spin, pour l'onde soumise à l'action d'un autre champ.

Un instrument essentiel de la théorie des ondes, aussi bien classiques que quantiques, est la *transformation de Fourier*, qui permet le passage aller-retour de la description de l'onde en termes spatio-temporels à sa description en termes de fréquences spectrales. Depuis la relativité restreinte et la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie, la fréquence  $k$  d'une onde plane est définie comme un quadrivecteur de l'espace-temps, et l'impulsion-énergie des points matériels associés lui est proportionnelle dans le rapport  $h$ . La transformation de Fourier fait passer de l'écriture  $\psi(x)$ , où  $x$  désigne l'instant-point général, à l'écriture  $\zeta(k)$ , pour les ondes solutions; il s'agit pour nous de l'écrire de manière invariante relativiste.

Dans le cas des ondes libres, sans spin ou avec spin, les intégrales triples suffisent à résoudre le problème. L'intégrale directe, prise dans l'espace-temps et donnant la décomposition spectrale de l'onde, est du type qu'on a dit précédemment. L'intégrale réciproque est prise, dans le 4-espace des fréquences, sur les deux nappes de l'hyperboloïde caractérisé par la *fréquence propre* ou *scalaire* des ondes considérées (c'est-à-dire aussi bien par la masse propre des particules associées). La nécessité de faire intervenir les fréquences négatives symétriquement aux fréquences positives est typiquement quantique : elle traduit, comme le reconnut Dirac dès 1928, et comme Feynman l'énonça de manière géométriquement plus symétrique en 1949, l'existence des *antiparticules* symétriques aux *particules* (le *positon*, par exemple, est l'antiparticule de l'électron ordinaire ou *négaton*). Formellement, toute cette partie de la théorie équivaut à une extension quadridimensionnelle de la théorie tridimensionnelle classique de la diffraction en régime permanent et monochromatique.

S'il s'agit maintenant d'ondes matérielles en interaction avec un autre champ, les choses se compliquent; l'invariance relativiste de la transformation de Fourier ne peut être obtenue que moyennant le recours à des intégrales quadruples portant sur la totalité soit de l'espace-temps soit de l'espace des quadri-fréquences. Ces intégrales quadruples sont l'outil fondamental de la théorie de Feynman. Ce qu'il y a d'un peu paradoxal (et nous y reviendrons) dans l'usage d'un tel formalisme d'intégrales quadruples, c'est que toute l'évolution des systèmes en interaction s'y trouve saisie à la fois, et que le *devenir* de la description est pour ainsi dire tué dans l'œuf.

Dans le cas particulier, pratiquement très important, où le champ extérieur est « conservatif », c'est-à-dire constant dans le temps en chaque point de l'espace (dans un certain repère spatio-temporel), l'on peut revenir à un schème d'intégrales triples; l'une sera prise à temps constant et arbitraire dans l'espace-temps, l'autre à énergie constante et bien déterminée dans le 4-espace  $k$ . Ceci est très bien mis en lumière par un calcul de Maurice Lévy, qui montre comment dans ce cas l'intégration de l'équation des ondes se ramène tout naturellement à un problème aux fonctions et valeurs propres posé en termes de variables d'espace et d'énergie seules. Il va sans dire que la forte dissymétrie de ce formalisme, soit en espace et temps, soit en impulsion et énergie, se trouve admirablement adaptée au caractère particulier du problème. Le désastre (on peut bien le dire) fut que, pendant quelque vingt ans, la théorie quantique fit tout son possible pour y faire entrer de force le cas général des régimes variables; et ce furent les calculs, si laborieux et inélégants, de la méthode dite de la *variation des constantes*, qui admettaient (si paradoxalement) la conservation rigoureuse de l'impulsion, mais statistique seulement de l'énergie. Le vice de méthode était en somme de chercher à penser le mouvement en termes de statique continuée, un peu comme quelqu'un qui ne parviendrait pas à rouler à bicyclette parce qu'il s'obstine à garder les pieds par

terre. C'est par la théorie de Schwinger-Dyson-Feynman que la symétrie, l'élégance et la concision ont été rétablies.

Une fois en possession de l'outil de base qu'on vient de caractériser brièvement, la physique doit franchir, et toujours en termes invariants relativistes, une nouvelle étape : la *superquantification*, destinée à traduire automatiquement le caractère entier des nombres d'occupation des ondes, conformément aux deux statistiques de particules indiscernables, celle des *fermions* et celle des *bosons*. Plusieurs auteurs (Valatin, Deprit, D. Kastler, R. Potier) ont récemment présenté ce schéma à partir des produits symétrisés ou antisymétrisés de fonctions d'ondes.

La superquantification a pour effet de transformer en *opérateur* la fonction d'onde, jusque là conçue comme une fonction algébrique : il s'agit de l'opérateur émetteur d'une particule et absorbeur d'une antiparticule, ou de son adjoint jouissant de la propriété symétrique. Ces opérateurs  $\psi$  et  $\bar{\psi}$  ont (respectivement dans le cas des *bosons* et dans celui des *fermions*) la propriété de commuter ou d'antic commuter. De plus, les propriétés de l'espace-temps (ou du 4-espace  $k$ ) ont leur mot à dire : deux  $\psi$  séparés par un intervalle du genre espace commutent toujours, la non-commutation n'intervenant que pour les intervalles du genre temps : c'est la version microphysique de la loi de propagation des signaux d'Einstein. La fonction d'onde, invariante relativiste, intervenant ici est (dans le cas des ondes libres) le *propagateur de Jordan-Pauli*, noté  $D(x-x')$  (qui intervient d'ailleurs aussi dans les formules invariants relativistes de résolution du problème de Cauchy pour la propagation des ondes). Ce  $D(x-x')$  est l'une des extensions quadridimensionnelles possibles des « fonctions de Green » de l'optique classique.

Cette nouvelle panoplie d'armes perfectionnées constitue l'arsenal de la théorie de Tomonaga-Schwinger. Celle-ci a réussi, pour la première fois, à écrire en forme invariante relativiste les équations de l'interaction de deux champs superquantifiés.

Dans la *description d'interaction* de Tomonaga-Schwinger, les équations d'onde des deux champs interagissants sont les équations d'ondes libres (par exemple les équations de Maxwell sans seconds membres et les équations de Dirac sans quadripotential, pour le système photon + électron). L'interaction est décrite au moyen d'un *hamiltonien d'interaction* invariant relativiste, ayant dimension de *densité d'énergie propre* ou de *densité d'action* (suivant qu'on se réfère à une intégration triple ou quadruple). La *fonction de répartition des nombres d'occupation* sur les états quantiques, dite encore *vecteur d'état* et notée  $\Psi$ , caractéristique des théories superquantifiées, est définie de manière covariante relativiste comme une *fonctionnelle d'hypersurface arbitraire du genre espace  $\sigma$*  (et non plus comme une fonction du temps  $t$ ). La possibilité de « feuilleter » arbitrairement l'espace-temps par ces familles de  $\sigma$  est garantie par la commutation des opérateurs  $\psi$  séparés par des intervalles du genre espace. Quant aux états sur lesquels se distribuent les nombres d'occupation  $n$ , ce sont des collections « orthogonales complètes » d'ondes solutions des équations d'ondes libres, définies par les intégrales triples qu'on a dites.

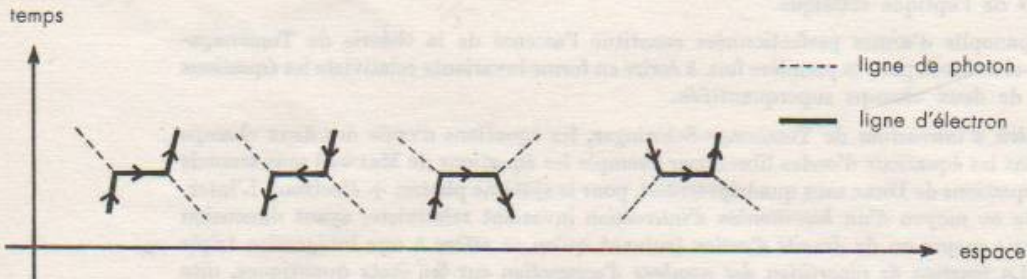
En contraste absolu avec la description d'interaction de Tomonaga-Schwinger, il y a, en théorie superquantifiée, une autre description invariante relativiste dite (pour des raisons historiques) *description à la Heisenberg*. Cette fois, les équations des champs d'ondes en interaction sont les équations « avec champs extérieurs » (équations de Maxwell avec seconds membres, et équations de Dirac avec quadripotential pour le système photon + électron) : c'est dire que le schéma d'intégrales quadruples qu'on a dit s'impose dès qu'on veut pouvoir parler le langage des quadrifréquences (comme ce sera le cas en théorie de Feynman). En outre, dans la description à la Heisenberg, la fonction de répartition  $\Psi$  des nombres d'occupation est invariable, en sorte qu'on peut la passer sous silence dans la plupart des formules. De toute manière, la description à la Heisenberg présente donc un caractère d'immuabilité : rien ne s'y passe, tout y est donné d'un coup sous un aspect d'éternité. La description d'interaction, au contraire, avec son schéma d'intégrales triples, ses transitions quantiques où l'on voit varier les nombres d'occupation, est une description « avec devenir » ; il s'y passe quelque chose. On peut dire aussi que la description d'interaction a un caractère manifestement quantique, tandis qu'au contraire, en description à la Heisenberg, les quanta sont occultes ; non seulement l'on s'y trouve ramené au déterminisme implacable de la physique classique, mais même aussi à la forme de ses équations pour les champs interagissants.

Le coup de théâtre (on peut bien le dire, quoi qu'il ait été préparé de longue date) est la possibilité démontrée par Schwinger, de passer à volonté, dans les deux sens, par une transformation covariante relativiste, de la description d'interaction à la description de Heisenberg. Nous reviendrons sur les implications épistémologiques de ce fait.

Un mot, pour terminer ceci, sur les règles de calcul de Feynman, dont Dyson a montré qu'elles se déduisent de la théorie de Tomonaga-Schwinger par un calcul d'approximations successives explicitement invariant relativiste. Ces règles permettent d'écrire d'un coup, directement en forme relativiste, les formules que l'ancienne procédure obtenait si laborieusement. Dans le nouveau formalisme, on admet la conservation rigoureuse de l'impulsion-énergie des corpuscules « virtuels » (émis et réabsorbés au cours du processus); mais, comme il faut manifestement retrouver le degré de liberté que s'accordait l'ancienne procédure sur la conservation de l'énergie, c'est à présent la masse propre du corpuscule virtuel qui est laissée libre.

En théorie de Feynman (comme en théorie de Tomonaga-Schwinger) la symétrie passé-futur des phénomènes élémentaires est aussi évidente qu'en mécanique newtonienne ou qu'en calcul des probabilités\*.

Mais la transformation de Fourier, conjointement aux propriétés des équations d'onde, apporte ici quelque chose de plus : la symétrie entre fréquences (ou énergies) positives et négatives, c'est-à-dire physiquement entre particules et antiparticules. Considérons par exemple les quatre graphes



de Feynman ci-dessous : le premier représente un effet Compton ordinaire, diffusion d'un électron avec absorption et réémission d'un photon; le second un effet Compton impliquant un positon; le troisième une annihilation de paire négaton + positon avec émission de deux photons, et le quatrième une création de paire par absorption de deux photons\*\*.

La théorie de Feynman considère ces quatre graphes comme topologiquement identiques, et donne une formule unique pour les quatre probabilités de transition, ce qui est physiquement exact.

A première vue un trait fort paradoxal se trouve impliqué en tout ceci : la probabilité « causale » attachée à un sous-graphe ne se transforme-t-elle pas en probabilité « finale » dans le sous-graphe temporellement réciproque? Ne semble-t-il pas apparaître là comme un appel de particules antécédentes par le mécanisme de la transition? Si l'on examine ce problème de près, l'on s'aperçoit que c'est le formalisme de la superquantification qui dissipe le fantôme d'une « causalité rétrograde », et que celui-ci resterait inévitable en statistique classique. Pour dire les choses en bref, les deux statistiques quantiques ont en commun le caractère très nouveau de faire figurer symétriquement les *nombre d'occupation de l'état final* à côté de ceux de l'état initial. Ce trait (qui, cela va sans dire, renforce encore la symétrie passé-futur du phénomène élémentaire) est tout à fait nécessaire à la cohérence de la théorie de Feynman; à nouveau, la superquantification se montre un élément indispensable de la réconciliation relativité-quanta.

\* Notons bien que la dissymétrie qu'introduit la formule de Bayes entre probabilités de prédiction et de rétro-diction résulte de considérations extrinsèques à la dynamique propre du système en étude; de droit, celle-ci est symétrique entre avenir et passé.

\*\* L'antiphoton n'étant pas physiquement distinct du photon, les lignes de photons n'ont pas à être fléchées.

## LA PHYSIQUE QUANTIQUE A LA FOIS ESSENTIELLEMENT ALÉATOIRE ET ESSENTIELLEMENT OBJECTIVE

Le lecteur s'attend certainement à nous voir prendre position dans le débat qui oppose actuellement les théoriciens partisans les uns d'un probabilisme essentiel, les autres d'un déterminisme caché de la physique. Cette querelle s'inscrit dans la grande alternative entre *modélisme* et *formalisme*, qui reste en permanence celle de l'option théoricienne. Le fait est que c'est en balançant perpétuellement d'un côté à l'autre que la physique avance. A l'exemple si fameux du modélisme de la mécanique statistique triomphant du formalisme de l'énergétique, s'oppose celui non moins fameux du formalisme de la relativité restreinte triomphant du modélisme des théories de l'éther. A quoi nous ajouterions malicieusement que l'austère et rigoureux formalisme des dernières versions de la mécanique statistique n'a rien à envier à celui de feu l'énergétique...

Nous estimons, quant à nous, que l'École épistémologique de Copenhague (dont on ne saurait sous-estimer la contribution si approfondie et si complète au problème) a pourtant commis avec son « subjectivisme » de graves excès. Nous pensons que, si le cosmos est par définition le lieu de rencontre des divers psychismes, *c'est par essence même qu'en fin de compte le langage de la physique doit rester objectiviste* (sans que cela veuille nécessairement dire *déterministe!*). La géométrie d'Euclide, première théorie de l'espace physique, explicitait l'objectivité sous-jacente aux diverses perspectives que les observateurs peuvent prendre sur les choses. La théorie de l'espace-temps pseudo-euclidien de Minkowski rétablissait semblablement une objectivité jusqu'alors inconnue par delà les *relativités* nouvellement découvertes par Einstein. Nous avons toujours pensé que la théorie des quanta devait pour son compte revivre la même aventure, et qu'une *objectivité* convenablement définie, *une covariance quantique*, devait apparaître au-delà du *relativisme quantique* impliqué dans la disparité des résultats des mesures des diverses expériences possibles. Nous avons eu la joie de nous rencontrer en ceci (quoi qu'en des termes variant d'un auteur à l'autre) avec l'illustre V. Fock, ainsi qu'avec le théoricien américain D. Park; et chacun peut aussi constater qu'en leurs plus récents écrits N. Bohr et W. Heisenberg se rapprochent singulièrement de ce point de vue.

Mais, pas plus que V. Fock ou que D. Park, nous ne nous rallions pour autant aux partisans de la théorie à déterminisme sous-jacent. La complexité de leur machinerie nous inquiète; elle nous semble rappeler celle des théories mécanistes de l'éther. Mais chacun sait que, dans toute option, l'on peut se tromper avec la meilleure bonne foi...

Notre épistémologie reste calquée sur le formalisme de la théorie des quanta tel qu'il est aujourd'hui fonctionnel. Et ce qui nous incline à penser que le problème d'un déterminisme sous-jacent à l'actuelle théorie est un faux problème, c'est précisément qu'il *suffit d'adopter la représentation à la Heisenberg pour rétablir un déterminisme absolu dans la description* (et un déterminisme encore accusé par l'usage d'un formalisme d'intégrales de Fourier quadruples).

Il ne faut pas oublier que les paradoxes d'une physique radicalement aléatoire, auxquels d'illustres physiciens sont aujourd'hui tellement sensibilisés, ont pour symétriques les paradoxes d'une physique radicalement déterministe, qui ne sont pas moins vertigineux à notre entendement. En 1934, dans son beau livre sur l'électron de Dirac, M. Louis de Broglie opposait à toute idée de réconcilier la relativité et les quanta par le moyen d'un schème d'intégrales quadruples d'espace-temps l'argument redoutable qu'une physique ainsi définie serait une physique sans devenir (\*); le champ en chaque instant-point y dépendrait non seulement de tout le contenu spatial (comme c'est le cas depuis l'origine de la « nouvelle théorie des quanta »), mais aussi de tout le contenu temporel, du plus lointain passé au plus lointain futur (comme cela suit alors de la demande même d'une symétrie spatio-temporelle).

Mais ce paradoxe, que Louis de Broglie faisait sentir si fortement en pressant les implications d'un schème d'intégrales quadruples, est en fait aussi vieux que la mécanique de Galilée-Newton : c'est le paradoxe même du déterminisme absolu. En veut-on la preuve sur le terrain même où M. Louis de Broglie portait le débat? Il suffit de prendre l'énoncé des lois de la dynamique sous leur forme

\* *L'électron magnétique* (Théorie de Dirac) Paris, Hermann, 1934.



non plus différentielle, mais intégrale et variationnelle : le principe d'extremum de Maupertuis-Hamilton comporte, lui-aussi, une intégration sur le temps. Et si l'on veut bien voir que l'essence même de cette technique (et donc du schème général qui la rend possible) est d'abolir *radicalement* le devenir temporel, il suffit de l'appliquer au cas où le champ extérieur varie au cours du temps : tout se passe alors comme si le point matériel avait à chaque instant à la fois la mémoire et la prémonition de tout ce qui s'est passé, se passe et se passera dans l'espace-temps. L'on se souvient du reste des commentaires étonnés qui avaient accueilli la promulgation du principe de Maupertuis (comme déjà semblablement celle du principe de Fermat de l'optique). La finalité avait été mise en accusation, mais la causalité l'eût été tout aussi valablement ; tant il est vrai, comme le dit Bergson en son *Évolution créatrice*, que le causalisme et le finalisme radicaux sont substantiellement identiques en ceci que, pour eux, *tout est donné* et que *rien n'arrive*.

En vérité, le déterminisme absolu n'est pas moins paradoxal à notre esprit que l'aléatoire essentiel ne l'est de son côté. La géométrie spatio-temporelle de Minkowski avait produit, semble-t-il, le statut par excellence de la description déterministe absolue. N'était-il pas de son essence même d'être irrécyclable avec le langage et le devenir essentiels des transitions quantiques ? Contre toute attente, nous savons aujourd'hui que non : la théorie superquantifiée, dans sa *description d'interaction*, nous gratifie d'une sorte de kaléidoscope à transitions, grâce auquel les contenus physiques de l'espace-temps se substituent les uns aux autres au gré de l'avancement de l'hyper-surface du genre espace  $\sigma$ . La description d'interaction apparaît ainsi comme une technique d'approximation tangentielle, qui centre l'intérêt sur la transition en cours arbitrairement définie et circonscrite ; un peu comme ces écriteaux qui, à l'avant des autobus, encadrent le nom de l'étape en cours, abstraction faite du tout du voyage.

Ce que personne ne soupçonnait en 1934, quand Louis de Broglie écrivait le texte que nous avons dit, c'est d'abord que la superquantification n'était pas un luxe, mais un élément essentiel et de la réconciliation relativité-quanta, et de la description adéquate des phénomènes physiques. Et c'est ensuite que la théorie superquantifiée contenait à la fois les deux descriptions antinomiques extrêmes du cosmos matériel, ainsi que la recette permettant à volonté de les substituer l'une à l'autre : la description d'interaction de Tomonaga-Schwinger, où la notion classique de l'*instant présent* trouve son substitut «  $\sigma$  », où des transitions se produisent, où « il se passe quelque chose » ; et la description à la Heisenberg où la totalité du devenir est déployée d'un coup, où les nombres d'occupation sont invariables, et qui est donc une description intemporelle, où « il ne se passe rien ». Précisément, parmi le faisceau de raisons nous écartant personnellement des théories « causales » à « déterminisme caché », il y a au premier chef celle-ci, que *le déterminisme radical est contenu en théorie superquantifiées comme l'une des descriptions possibles, qu'il est toujours loisible de produire à volonté*.

Le point capital pour la philosophie naturelle, c'est cette possibilité *actuelle* d'échanger à volonté la description radicalement déterministe et la description essentiellement aléatoire des phénomènes de l'échelle fine. Elle est directement corollaire de la *complémentarité* entre descriptions d'interaction et à la Heisenberg, qui consiste en ce que ces descriptions sont *de droit équivalentes, arbitrairement échangeables, mais l'une de l'autre exclusives\**. Cette complémentarité n'est d'ailleurs pas sans relation à la *complémentarité entre phases et nombres d'occupations*, qui est au cœur de la superquantification et dont nous reparlerons brièvement.

L'auteur de ces lignes ne considère pas comme redoutable (il le redira) le problème posé par la complémentarité entre description spatio-temporelle et description en termes de quadrifréquences : c'est le problème impliqué dans les relations d'indétermination de Heisenberg. Dans ce cas, le point de vue synthétique unificateur (et, qui plus est, invariant relativiste) est aisément trouvé. Il n'en va nullement de même avec la complémentarité entre nombres d'occupation et phases qui, trente ans après sa découverte par Dirac, reste nimbée d'énigme, et non maniable autrement que par les règles du jeu de la complémentarité.

\* Il existe en fait des *descriptions mixtes* où une partie de l'interaction est décrite à la Tomonaga-Schwinger et l'autre à la Heisenberg. Ce que nous voulons dire est qu'il faut *choisir* le mode de description de toute partie de l'interaction.

Ce qui tendrait à faire considérer la complémentarité entre description aléatoire et description déterministe comme touchant à quelque nœud tout à fait profond de la Nature, c'est que philosophes et théologiens l'ont depuis longtemps rencontrée dans leurs domaines et à leurs manières : qu'on songe par exemple à la querelle du libre arbitre et de la prédestination au temps de Port-Royal. Et, sans être aucunement expert en ce domaine ardu, tout au moins peut-on remarquer que le problème de la conciliation du devenir des actes humains et de l'éternité des desseins divins semble bien être, lui aussi, insaisissable autrement que par ce jeu de la balle qu'on se renvoie, ou de la chaîne dont on tient solidement les deux bouts sans bien voir par où elle passe.

Quoi qu'il en soit, faute de pouvoir s'élever au point de vue unificateur qui saisirait à la fois la thèse et l'antithèse, la physique en est réduite à l'emploi de la transformation de Schwinger, avec cette commutation qu'elle réalise entre descriptions déterministe et aléatoire. Et l'existence même de cette complémentarité *effectivement opératoire* dissout par mutuelle opposition deux systèmes de paradoxes irréductibles sans cela : ceux du déterminisme radical (absence de devenir), ceux de l'aléatoire radical (absence de détermination).

Il est extrêmement instructif de faire l'application de ces vues à la discussion de quelques expériences de pensée typiques, et par exemple aux expériences de phénomènes corrélés d'Einstein\*, d'Einstein-Podolsky-Rosen\*\*, de Schrödinger\*\*\*. Nous ne le ferons pas ici pour ne pas lasser le lecteur, que nous renvoyons pour plus de détails à notre livre à paraître. Disons en bref que la complémentarité qu'on vient de dire, jointe à la symétrie passé-futur du phénomène élémentaire, et à ce « caractère rigide et objectif », *pseudo-euclidien*, conféré par Minkowski à son espace-temps, nous paraissent les maîtres-mots nécessaires et suffisants au maniement de ces très subtils problèmes.

#### NOTRE RÉPONSE A LA QUESTION : QU'EST-CE QU'UN CORPUSCULE?

La doctrine de la complémentarité, du temps de sa jeunesse, a beaucoup parlé d'une « complémentarité entre les concepts onde et corpuscule » manifestée, selon elle, par la transformation de Fourier entre coordonnées et fréquences, ou encore par la discussion d'expériences de pensée comme celle des deux fentes de Young dont l'une peut être à volonté ouverte ou fermée. Nous considérons tout ce « discours » comme radicalement vicieux pour deux raisons : la première est que les manifestations d'une stricte localisation spatio-temporelle, où la théorie voulait voir les manifestations du *corpuscule*, sont bel et bien des manifestations *ondulatoires*, décrites par les « ondes à focalisation » du type D ( $x-x'$ ) précédemment résumé. Et notre seconde raison est que lorsqu'on s'astreint à discuter l'expérience de pensée des fentes de Young, par exemple, en termes strictement opératoires et conceptuellement purifiés, l'on voit que la *complémentarité* manifestée entre les deux aspects de l'expérience (deux fentes ouvertes, présence des franges d'interférence; une seule fente ouverte, pas de franges, mais possibilité de dire « par quelle fente est passé le quantum ») n'est autre que la *complémentarité entre différence de phases et nombres d'occupation* des deux ondes quasi-cylindriques sortant de l'écran. Sans doute y a-t-il quelque parenté de convenance entre les concepts *onde* et *phase* d'une part, *corpuscule* et *nombre d'occupation* de l'autre. Mais notre avis est que la nouvelle version, plus subtile, du discours interprétatif, est la seule qui soit à la fois exempte d'ambiguïtés conceptuelles, et explicitement covariante relativiste.

Le faux concept, à notre avis gros d'embûches, est celui qu'implique tout « discours » insinuant que le corpuscule serait quelque entité microscopique cachée au sein de l'onde, un peu comme une aiguille dans un tas de foin. Un exemple typique de ce discours est l'expression *relations d'incertitude* de Heisenberg, lourde d'un présupposé métaphysique, alors que l'expression phénoméniste

\* Conseil Solvay 1927.

\*\* *Physical Review* 47, 1935, p. 770.

\*\*\* *Naturwissenschaften* 23, 1935, p. 787, 823, 844.

est évidemment *relations d'indétermination* de Heisenberg. Telle est notamment une vue à laquelle nous avons été amené tout à fait indépendamment de l'illustre V. Fock\*.

Phénoménologiquement parlant, il n'existe aucune propriété de *forme* ou de *position*, soit dans l'espace-temps, soit dans l'espace des quadrifréquences, qui n'appartienne pas à l'onde  $\psi(x)$  ou  $\zeta(k)$ , et qui requière donc le concept d'un corpuscule. Le corpuscule, tel que nous le comprenons, ne saurait avoir ni forme, ni position, ni rien qui lui appartienne en propre. C'est l'onde matérielle quantifiée qui a des propriétés soit permanentes, soit accidentelles (mais alors patentes), toutes inscrites dans l'équation générale dont elle est solution, ou bien dans la solution particulière qui s'actualise physiquement. Quant au corpuscule, il n'est pour nous rien de plus que le nombre d'occupation, simple entité arithmétique attachée à l'onde  $\psi$  ou  $\zeta$ , et qui manifeste en somme l'un des niveaux d'excitation entiers qui lui sont possibles. Si donc le corpuscule ne peut aucunement avoir par lui-même une position ou une impulsion, le paradoxe qui semblait lié aux formules de Heisenberg s'évanouit.

Voilà maintes fois à présent que nous avons présenté cette argumentation et que nous avons trouvé que la comparaison illuminant le mieux notre façon de voir est un gracieux apologue, bien moins frivole qu'il n'en a l'air.

Notre particule, disions-nous, n'a rien qui lui appartienne en propre, mais *seulement un rôle* : animer une onde  $\psi$  à qui toutes les propriétés reviennent. Semblablement, les mannequins d'une maison de couture ont essentiellement un rôle : animer les robes d'une collection. Les détails variables d'une robe n'appartiennent pas plus à la personne du mannequin que la forme ou la position de l'onde n'appartiennent à la particule. Et de même qu'un mannequin ne peut évidemment animer à la fois deux robes de collections différentes, de même les nombres d'occupation de deux ondes de collections différentes ne pourront jamais être considérés comme des individualités communes aux deux collections.

Nous estimons que la réduction du concept de corpuscule à celui de nombre d'occupation fait s'évanouir tout un faisceau de faux problèmes. Nous pensons qu'au delà du voile de l'onde covariante relativiste, aux plis de laquelle s'anime et résonne la totalité de l'espace-temps, il n'y a rien à saisir. Ce vêtement flottant reste l'unique relais possible entre le monde de la perception humaine et la si lointaine microparticule. Elle est le seul filet propre à la capture de la matière cachée au sein de cette épaisseur d'océan.

Mais, si le corpuscule n'est rien de plus que le niveau d'excitation entier des ondes solutions d'une équation d'un certain type, est-ce à dire que notre épistémologie exclue le recours à des équations d'ondes non-linéaires, qui peut-être fourniraient la clé du problème des masses des particules élémentaires? Nullement : elle exclut simplement que de ces équations puisse émerger quelque propriété interprétable comme une forme étendue invariable\*\* des micro-particules. Il va sans dire qu'un certain type d'équation impose en commun certains caractères à ses solutions, mais il semble *a priori* exclu que l'un de ces caractères puisse être une forme spatio-temporelle qui se retrouve identique dans les diverses solutions.

\* *Annales de l'Institut H. Poincaré et Dialectica* (sous presse).

\*\* Nous maintenons cette opinion au su des expériences de Hofstadter (ou d'autres analogues) estimant que c'est une correction à l'expression des propagateurs, et donc à l'équation dont ils sont solutions, qui se trouve suggérée.

Olivier Costa de Beauregard est l'auteur de deux livres :  
La Théorie de la Relativité restreinte et La Théorie  
synthétique de la Relativité restreinte et des quanta.  
Maître de recherches au C.N.R.S., il est lauréat de  
l'Académie des Sciences.