

Louis de Broglie sa conception du monde physique¹

GEORGES LOCHAK

Président de la Fondation Louis de Broglie,
Ex-Directeur de Recherche au CNRS
Fondation Louis de Broglie, 23 rue Marsoulan, F-75012 Paris

1 La science

Dans les jardins de Bagatelle, où jouait jadis avec ses sœurs Louis de Broglie enfant, on pouvait admirer en 2001 une exposition sur « Les jardins persans » dont l'un des panneaux avait un sens allégorique :

« Alors que Le Nôtre et ses disciples tracèrent des espaces de clarté, des clairières ordonnées, recherchaient des lointains, des relations au ciel en entaillant les forêts, en définissant un ordre s'opposant à la confusion complexe, inquiétante et obscure des forêts environnantes, les architectes paysagistes persans inventèrent des îles végétales, des séquences, des moments de fraîcheur en territoires hostiles et désertiques.

Ainsi les jardins français témoignent-ils d'un combat livré à la nature environnante où arbres et arbustes furent assignés à des volumes définis, alors que la création des jardins persans affronte et défie un monde minéral omniprésent. Séparés par des siècles, sous des latitudes différentes, ces jardins frères s'opposent et se ressemblent en ce qu'ils témoignent d'une volonté d'imposer un ordre, une pensée lisible à la confusion du monde ambiant. »

Gérard Grandval

¹ Conférence d'ouverture du colloque réuni à l'Institut Henri Poincaré les 1^{er} et 2 décembre 2003 pour célébrer le 80^{ième} anniversaire de la découverte de l'onde de matière et le 30^{ième} anniversaire de la Fondation Louis de Broglie

Cet art des jardins, à la fois national et universel, portant l’empreinte de l’homme et de sa vision des choses, en même temps que la marque essentielle de la nature à laquelle il appartient et sur laquelle il s’exerce, représente aussi une image de la science. Car elle aussi vit sous le double signe de la particularité de l’homme et du pays qui la crée, et de l’universalité de ses résultats. L’observation patiente et méthodique, éclairée par des traits de génie, fait émerger de la nature un ordre, celui des lois physiques, qui nous semble jaillir avec tant d’évidence du désordre apparent des choses, qu’il nous paraît avoir toujours été là et que nous prenons nos lois physiques pour des lois de la nature. Nous oublions, ainsi, que nos constantes fondamentales ne sont peut-être pas aussi constantes que nous le croyons, que nos lois, regardées comme paroles d’Evangile, ne se vérifient qu’avec une certaine approximation, sous des conditions souvent étroites, jamais complètement réalisées et pendant des durées qui sont loin de l’âge que nous attribuons imprudemment à l’Univers.

Les lois de la physique sont des lois humaines ; quant aux lois de la nature, elles gardent leur secret et même le secret de leur existence. *L’harmonie n’est pas dans les choses, mais dans le regard que nous portons sur les choses*, parce que nous ne réfléchissons pas directement sur les objets naturels mais sur les concepts que forge notre esprit pour nous les représenter. C’est pourquoi, même quand les lois que nous découvrons représentent avec beaucoup de précision les faits expérimentaux, elles restent provisoires, sujettes à révision et plus restreintes que nous ne le croyons. La mécanique classique en a fait, il y a un siècle, la dure expérience.

Je faisais remarquer, un jour, à Louis de Broglie, que la loi du corps noir de Planck n’est pas vérifiée par l’expérience avec une grande précision. « C’est exact, me dit-il, et si nous y croyons c’est que cette loi s’intègre dans un ensemble de faits qui s’accordent avec la théorie des quanta. Mais il reste, entre la théorie et l’expérience, des interstices assez larges pour qu’un jour il s’y infiltre une nouvelle théorie. »

Je voulais mettre en relief cette marque personnelle que les hommes de science impriment sur les lois qu’ils découvrent, malgré leur caractère objectif, parce qu’on a tendance à l’oublier et que les puissantes écoles ont une propension à se croire universelles, à éluder les mérites des écoles rivales et à les gommer de l’histoire. Bien entendu, je dis cela en pensant spécialement à Louis de Broglie ce dont, en ce jour, on ne saurait me blâmer.

Souvent, on entend dire, et ce n’est pas innocent, que sans lui, tôt ou tard, l’onde eût été découverte, entendant par là qu’on n’avait pas besoin de lui.

C’est en partie vrai. Davisson et Kuntzman, en 1923, sans rien savoir des idées de de Broglie alors naissantes, ont observé, lors de la diffusion des

électrons sur une plaque métallique, d'étranges régularités qu'ils ne comprenaient pas. Davisson s'en est souvenu en 1927, en lisant la thèse de de Broglie : c'était l'onde qu'ils avaient vue. De même, Ramsauer a observé avant la fameuse thèse une transparence de l'argon aux électrons lents, d'abord niée par Max Born qui y voyait un artefact, or c'était une résonance de l'onde, en traversant les atomes.

De même, on peut dire que sans Einstein, la relativité eût existé, car Poincaré l'avait vue sous une autre forme et Lorentz avait trouvé, sans en reconnaître le sens, le groupe qui porte son nom. Ils seraient allés plus loin.

Et puisque nous parlons de Poincaré, signalons qu'il avait cherché, en 1904, une équation aux valeurs propres qui redonnerait les lois de Ritz et de Balmer, mais il ne voyait pas comment des entiers au carré pourraient apparaître au dénominateur. On croit rêver devant ce génie errant dans le noir et qui, s'il avait vécu davantage, aurait pu connaître Schrödinger.

Citons aussi l'atome de Bohr qui était dans l'air du temps, sous diverses formes, en France, en Angleterre, au Japon. Même la quantification des orbites a été entrevue avant lui par Nicholson.

Et Maxwell ! La plupart de ses équations étaient connues avant lui, « dans le désordre », mais un terme manquait, celui du courant de déplacement, or c'est là qu'était le génie, qui était surtout dans la vue d'ensemble, dans l'esprit de système qui émergeait du disparate et formait un tout.

Il y a toujours des précurseurs, mais justement, ce sont de tels traits de génie qui permettent d'affirmer que sans Maxwell, il n'y eut pas eu les célèbres équations. Comme sans Bohr il n'y eût pas eu d'atome de Bohr car c'est lui qui a compris que le plus léger des atomes ne devait avoir qu'un seul électron, quand tout le monde ne voyait que constellations et nébuleuses, et c'est lui qui a inclus l'atome dans une théorie générale. De même, sans Einstein, il n'y aurait pas eu de relativité car une grande théorie, ce n'est pas quelques formules, c'est une vision du monde. Or c'est lui qui a posé les deux principes de relativité et d'invariance de la vitesse de la lumière, qui a compris que la transformation de Lorentz en découle et qu'elle constitue une nouvelle représentation de l'espace et du temps.

Et enfin, c'est pour une raison analogue que la mécanique ondulatoire, c'est de Broglie et personne d'autre. C'est lui qui en a posé les grands principes et l'a conçue comme le sommet de l'évolution de la mécanique et de l'optique. Sa thèse commence par cette phrase de visionnaire :

« L'histoire des théories optiques montre que la pensée scientifique a longtemps hésité entre une conception dynamique et une conception ondu-

toire de la lumière : ces deux représentations sont donc sans doute moins en opposition qu'on ne l'avait supposé. »

Tout est dans cette première phrase. De là lui est venue l'idée de poursuivre ce cheminement parallèle de la mécanique et de l'optique, et de réunir en un seul système leurs deux pointes extrêmes qui ont bouleversé la physique du XX^e siècle : la relativité et les quanta.

2 La mécanique ondulatoire

C'est cette idée de synthèse qui l'a conduit à la formule de départ dont le premier membre appartient à la mécanique et le second à l'optique :

$$mc^2 = hv$$

Mais, contrairement à ce qu'on pourrait croire, il n'y avait pas d'onde dans cette formule car on ne franchit pas si facilement le pas du dualisme des ondes et des corpuscules. La fréquence ν n'était pas encore la fréquence d'une onde mais une fréquence interne que de Broglie introduisait pour modifier la loi de mouvement du corpuscule. En fait, il reprenait en termes modernes, la *théorie des accès* de l'optique de Newton, qu'il considérait, du reste, comme le lointain précurseur de la mécanique ondulatoire.

Au début, de Broglie ne pensait donc pas à identifier les principes de Maupertuis et de Fermat, mais l'idée lui est venue plus tard, quand il s'aperçut que, si ν était une fréquence interne, elle aurait la variance relativiste d'une fréquence d'horloge et, comme telle, retarderait, donc diminuerait avec la vitesse, tandis que la masse, dans mc^2 , augmente : la formule de départ n'est donc pas covariante relativiste. Ce n'est qu'après quelques mois d'interrogation et d'anxiété que, selon ses propres mots, « *Une grande lumière, dit-il, se fit soudain dans [son] esprit* » : si l'on associe au corpuscule, une onde qui reste en phase avec la fréquence interne du corpuscule dans son système propre, et si l'on récrit la formule $mc^2 = hv$, cette fois avec la fréquence de l'onde, la formule devient covariante car la fréquence de l'onde varie comme la masse.

C'est à ce point précis que la mécanique ondulatoire est née. Et de Broglie montra en outre que, bien que la fréquence de l'onde et celle du corpuscule soient différentes, en dehors du système propre, le corpuscule reste en phase avec l'onde dans tous les systèmes galiléens, car la différence des fréquences est compensée par la différence entre la vitesse du corpuscule et

la vitesse de phase de l'onde. Ces deux vitesses sont liées entre elles par une loi déjà pressentie par Hamilton :

$$Vv = c^2$$

En vertu de quoi l'onde se propage dans le vide plus vite que la lumière, ce qui ne contredit pas la relativité car de Broglie a montré que la vitesse de groupe (vitesse de l'énergie) est exactement égale à la vitesse du corpuscule. Ce dernier se laisse donc glisser le long de l'onde, en retardant sur elle.

Quant à la célèbre formule de la longueur d'onde, elle découle des deux formules précédentes :

$$\lambda = \frac{V}{v} = \frac{c^2}{v^2} = \frac{c^2}{\frac{mc^2}{h}v} = \frac{h}{mv}$$

où m est la masse relativiste.

Tout cela s'est retrouvé plus tard dans l'équation relativiste de Dirac, mais pas dans celle de Schrödinger qui trouve la longueur d'onde mais, faute de relativité, elle ne donne ni la vitesse de phase ni la fréquence de l'onde.

Ces dernières grandeurs n'ont pas été directement mesurées jusqu'à présent, mais de Broglie a montré que, de la seule mesure expérimentale de λ , on peut déduire V et v par un raisonnement purement relativiste (qui ne fait pas intervenir les quanta).

Ce que je viens de raconter ne se trouve dans aucun livre de mécanique quantique, si bien que, depuis 80 ans, des générations entières de physiciens ont ignoré les bases de la mécanique ondulatoire. Car il ne s'agit pas ici de quelque artifice au moyen duquel de Broglie aurait trouvé l'onde par chance. Il s'agit des fondements mêmes de la théorie.

Le lien entre la particule et l'onde, glissant l'une sur l'autre en restant en phase à leur point de contact, de Broglie l'appelait la *loi de l'accord des phases* et il considérait que s'il avait eu une idée dans sa vie, une seule, c'était celle-là. Or elle est parfaitement inconnue et la plupart des physiciens à qui on l'exposerait n'y verraient pas d'intérêt, alors que *c'est pratiquement le seul lien fermement établi entre l'onde et la particule*.

Certes, on peut le contester, mais il est inadmissible de l'ignorer. Il est vrai qu'il existe une tendance à dire que les grands hommes ne comprennent pas grand-chose à leurs découvertes. Fock trouvait qu'Einstein ne comprenait pas la relativité générale. Quant à Maxwell, on a oublié que sa théorie n'était pas basée sur les champs mais sur les potentiels qu'il trouvait

physiquement définis, alors qu'aujourd'hui, les champs passent en premier et les potentiels sont réduits au rôle d'intermédiaires mathématiques.

Or les potentiels jouent un rôle important en mécanique ondulatoire qui, quoi qu'on en dise, n'est pas vraiment invariante de jauge. Car, en présence d'un potentiel magnétique, le vecteur d'onde \mathbf{k} n'est plus défini par l'impulsion $m\mathbf{v}$, comme nous l'avons dit, mais par le moment de Lagrange, lequel dépend du potentiel magnétique :

$$\mathbf{p} = h\mathbf{k} = \frac{h}{\lambda}\mathbf{n} = m\mathbf{v} + e\mathbf{A}$$

Cette formule se trouve dans la thèse de de Broglie et découle directement de l'identification des principes de Maupertuis et de Fermat. Il s'ensuit que les phénomènes de diffraction et d'interférence des ondes de de Broglie sont modifiés par un potentiel magnétique, qu'il engendre ou non un champ magnétique. La formule précédente contient l'effet Aharonov-Bohm, qui résulte d'une *propriété locale du potentiel magnétique* et n'a rien à voir avec un flux de champ : il découle des bases de la mécanique et de l'optique.

Cette formule et les effets qui s'ensuivent ne sont pas invariants de jauge, sinon, en ajoutant un gradient de phase, la longueur d'onde changerait arbitrairement et il n'y aurait plus de diffraction des électrons. Ajoutons avec de

Broglie que c'est même vrai dans le vide car, si la formule $\lambda = \frac{h}{m\mathbf{v}}$ dépendait

de la jauge, la longueur d'onde serait indéterminée et il n'y aurait toujours pas de diffraction.

3 L'interprétation de l'onde

Revenons à la loi de l'accord des phases. Elle était fondamentale pour de Broglie parce qu'il ne croyait pas qu'un électron ou tout autre élément de matière puisse être, selon la formule consacrée : « Tantôt onde, tantôt particule ». Il ne voyait là que des mots éludant un problème. Il pensait, quant à lui, que l'électron, ou une autre particule, est *à la fois onde et corpuscule* et que c'est cela que la physique doit chercher à décrire. Il pensait que la loi de l'accord des phases constituait un pas dans cette direction, en établissant un lien entre ces deux notions apparemment antagonistes, qu'il ne mettait d'ailleurs pas sur le même plan.

Si on analyse les conditions d'observation et de mesure, on constate que c'est la particule qu'on observe, et non pas l'onde ; mais c'est l'évolution de l'onde qui permet de prévoir le mouvement de la particule, ce qui suggère

que *son rôle est de guider la particule*. Notons qu'en électromagnétisme, on a l'impression de mesurer directement un champ, donc une onde, mais en réalité, les échanges d'énergie se font par photons. Comme ce sont des particules de Bose, leur accumulation cohérente sur les ondes de de Broglie crée le champ de Maxwell que nous mesurons, mais en définitive, ce sont bien des particules que nous enregistrons.

En 1925, dans une Note à l'Académie, de Broglie est allé plus loin que la loi de l'accord des phases en montrant qu'on peut même considérer que *la particule n'existe pas en elle-même, et qu'elle n'est qu'une singularité de l'onde*. On comprend pourquoi l'équation de propagation de l'onde fixe la loi du mouvement de la particule : c'est ce que de Broglie appellera la *loi du guidage*. Cela se passait avant l'équation de Schrödinger, mais de Broglie avait déjà donné une première approche de ce qui allait devenir l'équation de Klein-Gordon. Du reste, Dirac et Tomonaga qui le savaient disaient : « Equation de de Broglie ».

Cette loi du guidage d'une singularité par l'onde a été suivie, deux ans après, par le théorème d'Einstein et Grommer, qui proposait indépendamment la même idée en relativité générale, en montrant que les équations d'Einstein du champ de gravitation entraînent le mouvement d'une singularité le long des géodésiques de l'espace, courbé par le champ de gravitation. Autrement dit, les seules équations de champ entraînent la loi du mouvement de la matière, supprimant ainsi le postulat des géodésiques. C'est exactement ce que disait de Broglie : la loi des ondes entraîne la loi du mouvement en mécanique ondulatoire. Sauf que dans ce dernier cas, la linéarité des équations crée une difficulté qui est absente de la relativité générale.

Cette idée de de Broglie et d'Einstein, exprimée sous des formes différentes, est sans doute l'une des grandes idées physiques du XX^e siècle. En effet, l'image du monde de Newton, celle d'éléments de matière se déplaçant dans le vide, avait déjà été bouleversée par l'image rivale, due à Faraday et à Maxwell, d'un monde peuplé de champs continus : sorti du fond des âges, le monde oublié d'Anaxagore revenait concurrencer celui de Démocrite. Ce fut, a dit Einstein, la plus grande découverte scientifique depuis Newton.

Mais le dualisme ainsi introduit en physique était lourd de remous révolutionnaires qui se manifestèrent dès la théorie des électrons de Lorentz, puis avec la théorie du corps noir de Planck qui poussa Einstein à l'hypothèse du photon, qui mit vingt ans à s'imposer tant elle parut scandaleuse. Et enfin, la révolution éclata avec l'onde de de Broglie et le problème général du dualisme des ondes et des corpuscules.

A ce propos, j'ai passé sous silence, un peu plus haut, un fait qui avait échappé à tout le monde, y compris à de Broglie. En effet, j'ai cité son

théorème sur la vitesse de groupe, mais pour trouver une vitesse de groupe, il faut non pas une onde monochromatique, mais un train d'ondes et donc une bande de fréquences associée à la particule. Mais comme : $mc^2 = h\nu$, cela signifie qu'on lui associe une bande de vitesses et non pas une vitesse déterminée. Autrement dit, les ennuis qu'allait nous causer Heisenberg avec ses relations d'incertitudes perçaient déjà, dès le début de la théorie !

Néanmoins, la loi de l'accord des phases et le théorème sur la vitesse de groupe sont les deux premiers pas vers un lien entre la particule et l'onde. C'est même le seul lien certain que nous connaissions jusqu'à présent.

Alors que, dans les travaux d'Einstein sur la lumière, la particule (le photon) et l'onde sont séparés, de Broglie a posé dès 1922 le problème d'une dynamique du photon dans les phénomènes d'interférences. C'est pourquoi il a toujours considéré que le photon doit être doué d'une masse comme les autres particules, cette masse dût-elle être très petite, pour s'accorder avec les lois de l'électromagnétisme, mais pas nulle, pour avoir une vision globale du monde corpusculaire.

La coexistence de l'onde et du corpuscule, dans le cas de la lumière, a conduit de Broglie, en 1923, à la mécanique ondulatoire. Mais l'origine de sa théorie, la lumière, le projet d'une fusion entre l'optique et la mécanique, l'idée du guidage de la particule par l'onde, autrement dit les idées-forces qui l'ont conduit à cette découverte, ont en même temps limité sur certains points son champ de vision. Etant comme obnubilé par la lumière (si l'on me permet cet oximoron), il a eu du mal, au début, à admettre que l'onde qu'il avait introduite n'était pas une onde électromagnétique. Cette confusion, qui n'a pas duré, lui a fait commettre quelques erreurs. Mais il y avait une limitation plus grave : l'idée des trajectoires l'a confiné à l'optique géométrique. Et c'est là qu'est la grande découverte de Schrödinger. Elle n'est pas tant dans l'équation, dont de Broglie n'était pas loin, sous la forme de Klein-Gordon (que Schrödinger avait vue aussi, du reste) : le trait de génie de Schrödinger est d'avoir su quitter l'optique géométrique pour se plonger dans la théorie générale des ondes. Mais alors apparut une contradiction : les trajectoires ont entièrement disparu et, d'une certaine manière, la mécanique ondulatoire s'est scindée en deux, celle de Schrödinger et celle de de Broglie.

Schrödinger excelle, comme on sait, aux états liés qui firent sa gloire, mais les états de propagation, spécialement la théorie des collisions, pourtant si importante, comportent des difficultés, dissimulées dans les traités sous des artifices qui ne sont pas innocents, qui consistent notamment à éluder une partie gênante d'une solution de l'équation en ne gardant que la partie conforme aux faits observés, en oubliant que, s'il est vrai que, dans une

équation linéaire, la somme de deux solutions est une solution, la « moitié » d'une solution n'en est pas une. On trouve cela dans les formules de l'effet Raman ou de la diffusion coulombienne.

Chez de Broglie, on triche dans l'autre sens. Lui, au contraire, excelle aux états de propagation, plus proches de l'optique géométrique. On a obtenu, grâce à sa loi du guidage des singularités, des résultats remarquables. Ainsi, l'un d'entre nous, Francis Fer, a montré rigoureusement que le guidage des particules les mène automatiquement vers les franges claires dans les phénomènes d'interférences. Mais si, au contraire, on cherche à décrire par le même procédé un atome d'hydrogène, on est contraint à des calculs contorsionnés avec des hypothèses adjuvantes douteuses.

Pour l'instant, force est d'admettre que l'interprétation probabiliste est seule capable de prévoir l'essentiel des faits accessibles à la mécanique quantique, bien qu'elle ne décrive pas vraiment les phénomènes et que le lien entre la particule et l'onde lui échappe. La théorie du guidage (avec ses avatars de l'onde pilote ou de la double solution), peut séduire par sa description plus physique, mais elle est loin d'être logiquement simple et d'embrasser l'ensemble des faits expliqués par la théorie. Pourtant, depuis la résurgence, avec les théories de Newton et de Maxwell, du vieil antagonisme entre les deux grandes représentations du monde en termes de continu et de discontinu, on peut dire que l'idée selon laquelle la matière serait une bosse ou une singularité du champ est la seule tentative de synthèse entre ces deux conceptions. Elle date en réalité de 1913 avec la théorie de Mie qui considérait l'électron comme une bosse du champ électromagnétique. Elle fut reprise en 1934 par Max Born, d'abord seul puis avec Léopold Infeld. Les théories de de Broglie (1926) et d'Einstein (1927) s'intercalent entre les précédentes et reposent sur la même idée mais pas en électromagnétisme : l'une concerne la mécanique ondulatoire et l'autre la relativité générale.

Aucune de ces théories n'a été menée jusqu'au bout avec suffisamment de généralité, mais des idées aussi vastes cheminent lentement. La théorie des ondes a mis deux siècles et les atomes deux millénaires. Je pense que la théorie de l'onde à bosse est du même ordre et qu'elle finira par triompher sous une forme impossible à prévoir. Elle nécessite peut-être plusieurs révolutions scientifiques.

4 La théorie de la lumière

Cela étant, de Broglie n'a pas passé le restant de sa vie en vaines tentatives. Il a écrit deux cents mémoires et quarante-cinq livres. Il a fait progresser la mécanique ondulatoire dans tous les domaines, suivi par une cohorte d'élèves, auteurs à leur tour de 270 thèses et de centaines de livres.

Dans les quarante ans qui ont suivi la mécanique ondulatoire, outre ses nombreux travaux, de Broglie a eu deux grandes idées.

La première de ces idées est sa théorie de la lumière dite « neutrinienne » car elle est fondée sur l'idée que le photon résulte de la fusion de deux particules neutres de Dirac, des neutrinos. Cette théorie date de 1934, quand le neutrino était encore hypothétique. Mais de Broglie fut de ceux qui y ont cru dès que Pauli l'a proposé (en 1930), de même qu'il a tout de suite admis les énergies négatives de Dirac (1928). Pour résumer la théorie de de Broglie on peut dire qu'il a montré que le mouvement du centre de gravité de deux particules de Dirac obéit aux équations de Maxwell, ce qui signifie que pour lui, le neutrino et le photon ont tous deux une masse au repos, très faible. En fait, la masse du photon s'impose par la cohérence logique de sa théorie.

De nos jours, on commence à admettre la masse du neutrino, bien qu'elle ne soit pas encore prouvée. Mais la masse du photon continue d'agacer parce qu'elle contrevient à l'invariance de jauge. Pourtant, on a montré qu'une faible masse du photon s'accorde avec toutes les lois connues de l'électromagnétisme. Et l'on ne doit pas oublier que l'invariance de jauge, comme toute loi de symétrie, est un postulat théorique que l'expérience ne peut vérifier qu'approximativement : une bonne théorie doit donc être structurellement stable et admettre de tels écarts, et c'est précisément le cas pour l'électromagnétisme. En revanche, les termes de masse dans les équations de Maxwell créent des liens entre grandeurs électromagnétiques ; les potentiels électromagnétiques retrouvent ainsi leur importance, ce qui va dans le sens de la mécanique ondulatoire, comme on l'a vu.

Mais la polémique demeure et c'est pourquoi la théorie de la lumière de de Broglie reste insuffisamment connue. Mais notons qu'Heisenberg lui attachait une grande importance et considérait qu'elle « soulevait d'aussi importants problèmes de principe que la découverte des ondes de matière ». L'un de ses élèves et ami, Harald Stumpf, et moi-même, avons écrit un livre sur ces problèmes en développant les travaux de nos deux maîtres respectifs.

La théorie de la lumière de de Broglie a été développée par lui-même et différents auteurs, notamment par l'une de ses brillantes élèves, Marie-Antoinette Tonnelat qui en a fait le sujet de sa thèse. Il en a résulté une théorie du graviton et une nouvelle version de la théorie du champ unitaire d'Einstein car le graviton et le photon y apparaissent intrinsèquement liés. J'ai fait récemment progresser cette théorie sur deux points importants :

- 1) J'ai montré que la théorie de la lumière de de Broglie contient en réalité deux photons différents. L'un est le « photon électrique » qui gouverne l'action d'un champ électromagnétique sur les particules chargées électriquement. L'autre est un « photon magnétique » qui gouverne

l'interaction entre le champ électromagnétique et un monopôle magnétique.

- 2) Réexaminant ensuite la théorie du graviton de de Broglie-Tonnellat, j'ai montré que le photon associé au graviton n'est pas le photon électrique, comme ils l'ont cru, mais le photon magnétique, ce qui offre une nouvelle voie à la théorie du champ unitaire.

5 La thermodynamique cachée.

L'autre grande idée de de Broglie, à laquelle je faisais allusion, est la « Thermodynamique de la particule isolée », ou « Thermodynamique cachée des particules ». C'est une tentative de réunir les trois grands principes extrêmes de la physique : les principes de Fermat, de Maupertuis et de Carnot, ce dernier devant décrire les transitions quantiques en tant que processus évolutifs. Louis de Broglie a développé cette théorie dans plusieurs livres, mais elle reste embryonnaire. Je crois que cette idée est aussi importante que la mécanique ondulatoire, mais c'est une théorie du futur pour une raison fondamentale.

Jadis, la mécanique ondulatoire et la mécanique quantique ont dû leur développement théorique, et par là leurs succès expérimentaux, au cadre bien établi de la mécanique de Lagrange, Hamilton et Jacobi, dans laquelle les théories nouvelles se sont fondues en la reformulant. Aujourd'hui, cette dynamique analytique, à laquelle de Broglie, comme tout le monde, a fait jadis appel, est devenue un obstacle à sa théorie.

Je parlais, en effet, de principes extrêmes, qui sont des principes de stationnarité dans lesquels le temps est réversible. C'est vrai pour le principe de Fermat en optique et pour le principe de moindre action, lequel est en fait mal nommé car il n'est pas du tout un principe de minimum mais un principe extrême comme le principe de Fermat : c'est la raison pour laquelle de Broglie a pu les réunir, jadis, en un même principe. Mais il en est autrement pour le principe de Carnot qui n'est un principe extrême, comme les deux premiers, que dans les états d'équilibre thermodynamique. Or le second principe de la thermodynamique est un vrai principe de minimum (ou de maximum), un principe d'évolution qui définit une irréversibilité. On peut y voir une façon de décrire les transitions quantiques, mais alors, la dynamique analytique et l'optique, en tant que principes extrêmes, vont tirer la théorie vers le bas et constituer un obstacle à son développement. Il faut une nouvelle dynamique pour l'associer à la thermodynamique. Une telle dynamique existe. Les principes en ont été jetés, jadis, par Poincaré et Liapounov et elle s'est développée au XX^e siècle avec la théorie générale des systèmes dynamiques, mais elle est loin d'atteindre les qualités formelles de la dy-

namique analytique. Elle n'est pas « fournisseuse d'équations » et n'est capable d'apporter une aide à la physique que si celle-ci lui soumet une équation mais, à l'encontre de sa grande sœur, la dynamique analytique, elle ne propose pas de cadre pour une équation nouvelle.

La raison est évidente : la dynamique des états extrêmes réversibles, malgré la généralité de ses applications, est par essence restrictive. C'est cela qui définit un cadre et donc un guide pour la physique, du moins pour les problèmes qui veulent bien y entrer. Au contraire, la théorie générale des systèmes dynamiques affaiblit ces restrictions. Même si elle est capable de donner des propriétés générales comme la théorie de la stabilité du mouvement, ou des structures topologiques, elle ne peut plus donner, en raison même de sa généralité, des formes précises comme le fait la dynamique analytique.

La physique se trouve, dès lors, livrée à un champ infini d'équations possibles et elle ne peut se fier qu'à ses propres analyses. Elle peut le faire de deux façons : soit en modélisant les phénomènes comme le font l'électronique ou la mécanique des fluides, par exemple, soit en allant chercher dans d'autres théories les principes généraux dont elle a besoin. C'est ce qu'a fait de Broglie en rapprochant la thermodynamique de l'optique et de la mécanique, mais précisément, la thermodynamique ne répond avec précision, pour l'instant, que dans les cas où les deux autres sciences répondent aussi. L'avenir dira si on peut faire mieux.

6 L'idée que Louis de Broglie se faisait de la physique.

Les trois grandes questions que nous venons d'évoquer : l'onde de matière, la théorie de la lumière et la thermodynamique « cachée », montrent comment de Broglie faisait de la physique. Sauf rares exceptions, il ne s'intéressait qu'aux questions fondamentales et ne résolvait des problèmes subalternes que s'ils servaient aux problèmes généraux. Et cela, avec une attitude qui caractérise la physique française : il partait le plus souvent de l'énoncé ou de la recherche d'un grand principe unificateur pour redescendre ensuite vers l'expérience et les applications. C'est l'inverse que font souvent les hommes de science anglais, par exemple, qui partent volontiers de faits expérimentaux ou de problèmes d'apparence modeste, pour s'élever ensuite vers des énoncés généraux : les plus grands l'ont fait, à commencer par Newton et Maxwell.

En mettant les principes en avant, de Broglie était le fils de Fermat, Laplace, Carnot, Fresnel, Poincaré, Curie. Mais il était tout autant le fils de la physique allemande : celle d'Helmholtz, Boltzmann, Planck et Einstein. Quand il est parti au service militaire, en 1913, il n'a emporté qu'un seul

livre de science : la *Thermodynamique* de Planck. Mais, forcé par la guerre, il a fait, au Mont Valérien puis à la Tour Eiffel, cinq ans d'électromagnétisme appliqué à la radio, cinq années qui l'ont marqué, y compris en physique :

« *Quand on s'est sali les mains, m'a-t-il dit, des jours et des nuits, à faire démarrer les gros alternateurs qui servaient à l'époque aux émissions de radio, il n'est plus si facile de croire qu'une onde ne puisse être qu'une probabilité de présence.* »

Je pourrais longtemps parler de cela : de son réalisme en physique, de sa recherche de la causalité et des paramètres cachés, de son besoin d'images claires dans l'espace et dans le temps et de son sens des analogies. Je pourrais parler de sa conviction que le temps s'écoule dans un sens déterminé, même au niveau microscopique, différant en cela de l'espace, contrairement à ce que suggère la relativité. Je pourrais aussi parler de la prééminence qu'il donnait à la particule sur l'onde, contrairement à ce qu'on pouvait attendre de lui et contrairement à ce que pensait son *alter ego* Erwin Schrödinger.

J'ai beaucoup écrit là-dessus et lui bien davantage et bien mieux. Je ne le ferai pas ici. Je voudrais terminer sur l'idée qu'il se faisait de la physique. Son idée de la science constitue le principal héritage qu'il lègue à la fondation qui porte son nom et sans laquelle cette fondation n'a pas de sens. C'est l'idée que la science est une aventure de l'esprit et qu'elle ne vaut que sur les sommets. La science n'est pas là pour résoudre des petits problèmes et chercher des applications. La science est un projet, celui de créer et d'enrichir une image du monde qui, certes, évolue et change dans ses formes et dans son expression mais qui reste un édifice harmonieux comme le montre l'étonnante continuité entre la science grecque et la nôtre malgré les siècles de progrès et de revirements. Les applications viennent par surcroît ; elles peuvent parfois être le fait des scientifiques eux-mêmes, mais ceux-ci n'ont pas à s'en faire les esclaves. Leur ambition est d'aller vers l'inconnu, d'en chercher le secret et de le fondre, s'ils le peuvent, en un tout harmonieux. Ce sont leurs découvertes qui sont la source des applications et non l'inverse. Seule la science fondamentale - et rien d'autre - tire la science en avant. Si l'on avait mis au concours un procédé pour voir le corps humain par transparence, on n'aurait jamais trouvé les rayons X.

Il peut arriver que l'industrie ouvre un nouveau champ de recherche, comme ce fut le cas pour la machine à vapeur et la thermodynamique, mais les découvertes qui s'ensuivent résultent d'une libre interrogation et d'une évocation de l'esprit et non de la réponse à tel point pratique.

On ne devient pas un homme de science en tournant autour de petits problèmes et en s'enfermant dans le quotidien.

Notre premier Président, Louis Néel, écrivait dans ses Mémoires :

« Personnellement, je préfère explorer les forêts vierges que cultiver un jardin de curé. »

Son successeur, René Thom, disait :

« Ce qui limite le vrai n'est pas le faux, mais l'insignifiant. »

Quant à Einstein,

« Je n'aime pas, disait-il, les physiciens qui prennent une planche en bois tendre, choisissent un endroit mince et sans nœud et à cet endroit percent un grand nombre de trous. »

C'est leur exemple que nous devons suivre en ayant le courage de repousser le conformisme et la médiocrité, en ayant l'audace d'affronter, au contraire, les grandes difficultés, celles qu'on n'est pas sûr de vaincre. Ce qui veut dire que le problème fondamental de l'organisation de la recherche, celui dont on parle malheureusement en dernier, ou pas du tout, est de protéger les idées neuves. Souvenons-nous de ce qu'a dit Louis de Broglie :

« Si les idées des savants de génie qui ont été les promoteurs de la science moderne avaient été soumises à des commissions de spécialistes, elles auraient sans nul doute paru extravagantes et auraient été écartées en raison même de leur originalité et de leur profondeur. »

C'était vrai de son vivant et plus encore aujourd'hui. Dans certains milieux, avant tout dans les commissions, son nom reste honni à cause de son refus de suivre certaines modes et l'on cherche encore à évincer ses plus proches élèves des lieux mêmes où il avait enseigné. Je ne l'ai que trop su pendant ma longue carrière, et encore très récemment.

De Broglie n'est pas seul à être traité ainsi par une communauté scientifique, sûre d'elle-même et de ses légions, arc-boutée sur ses dogmes et traçant impérieusement les limites autorisées à la novation, après quoi l'on s'étonne que la science soit en crise.

Ni Néel ni Thom n'étaient de l'École de de Broglie, mais ils étaient de la même race, avec la même indépendance d'esprit. En fait, il y a deux sortes de physiciens qu'on reconnaît immédiatement quand on leur raconte une nouvelle théorie ou une expérience étonnante.

Il y a les bureaucrates, qui réagissent en craignant le mystère et le succès possible de l'idée nouvelle. Ils enquêtent, cherchent si les auteurs sont « sérieux », s'ils appartiennent à un laboratoire respectable, si quelqu'un d'autre, de préférence à l'étranger, a vérifié leurs résultats. Ils ne lisent pas la théorie, mais cherchent des objections, essayent de la remplacer par une théorie existante et proclament que tout ça est faux mais connu depuis longtemps. S'il s'agit d'une expérience, ils n'écourent pas le résultat, mais se lancent dans la chasse aux artefacts, accusant l'auteur, « ce pelé, ce galeux », de ne l'avoir pas fait. L'un de ceux-là m'a dit : « *Je ne crois qu'aux expériences qu'on a refait trois mille fois* ». Je lui ai répondu : « *Les expériences refaites trois mille fois, sont dans les manuels* ».

Mais il y a d'autres physiciens, à la curiosité toujours en éveil, qui écoutent la chose en elle-même, comme un fait nouveau, sans chercher à l'inclure dans un système (ou à l'en exclure), qui se demandent ce que la théorie ou l'expérience qu'on leur raconte apporte de nouveau et quelles perspectives elle ouvre. Ce n'est qu'après qu'ils s'enquêtent des détails, mais pas pour détruire, car ils savent qu'une nouvelle théorie comporte toujours des maladresses, des aspects non démontrés et même des erreurs. Quant à l'expérience, elle n'a été faite qu'un petit nombre de fois et les premières conclusions relèvent de l'intuition du physicien qui écarte des points réputés parasites pour discerner les bons points au milieu d'un nuage de mauvais (ou supposés tels), avant que les résultats, peu à peu se resserrent et tendent vers la certitude, si tant est que la science soit jamais certaine.

Un vrai physicien est celui qui n'est jamais aussi heureux que lorsqu'il se trouve devant un phénomène qu'il ne comprend pas. C'est celui qui saisit la balle au bond quand on ne sait pas encore où elle va, qui la relance en sachant prendre des risques, qui devine avant de savoir et qui sait avant d'avoir prouvé. Mais qui prouve, ensuite, bien sûr !

Einstein qui avait, comme Newton, de curieux accès de modestie, a dit qu'il n'avait pas tant d'idées nouvelles qu'une aptitude à se saisir des idées d'autrui. Quand on connaît son œuvre, on s'aperçoit que c'était souvent le cas et qu'il y a bien des idées, subtiles mais auxquelles il manquait un trait de génie, qui seraient passées inaperçues, oubliées ou dormantes s'il ne s'en était emparé pour en faire des chefs d'œuvre.

7 La Fondation.

C'est de ces exemples qu'une fondation comme la nôtre doit s'inspirer car si l'on ne regarde pas les sommets, on se confine au terre-à-terre. Une fondation qui porte un aussi grand nom que celui de Louis de Broglie n'est pas un club agréable et douillet comme certains ont voulu l'y conduire, « un lieu de rencontre entre gens modestes et compétents qui travaillent honnêtement et se réunissent de temps à autre pour échanger des vues ».

Non ! La Fondation n'a de sens que si elle encourage et féconde des idées nouvelles et audacieuses, si elle affronte la controverse et fait naître la passion de la découverte. Nous ne sommes pas là pour faire des retouches et évoquer des souvenirs mais pour prolonger le séminaire de Broglie qui s'est réuni pendant trente ans à l'Institut Henri Poincaré et pendant douze ans à l'Académie des Sciences : c'est inscrit dans nos statuts. C'était un séminaire où l'on avait le droit de tout dire, d'émettre les hypothèses les plus hasardeuses car le désir de refaire le monde y était soutenu par un maître qui n'avait pas peur des idées et qui était orfèvre en la matière.

Une telle fondation est d'autant plus nécessaire de nos jours que la science en général et la science française en particulier est à la croisée des chemins. La jeunesse s'en détourne, les Facultés se vident, les vocations ne se renouvellent pas.

Il ne faut pas en accuser les sirènes de l'informatique et de l'industrie car c'est faux. Il y a plus d'un siècle que les applications attirent de nombreux talents scientifiques et c'est une chose normale, profitable à tous. Si la recherche fondamentale est en crise ce n'est pas seulement pour des raisons budgétaires, qui existent certes, mais c'est aussi par manque d'idées nouvelles.

La physique vit sur des idées qui datent pour l'essentiel d'il y a trois quarts de siècle, sur lesquelles on greffe des efflorescences de plus en plus savantes mathématiquement, de plus en plus encombrantes, de plus en plus lourdes, mais dont les résultats ne sont pas en proportion. L'expérience exploite habilement le même capital d'idées et en développe les applications, mais elle étonne davantage par ses progrès techniques que par la nouveauté des questions qu'elle soulève.

Comment la science ne se scléroserait-elle pas dans des idées acquises, quand les grands instituts, leurs commissions de spécialistes et les comités de lecture des revues scientifiques s'en font les gardiens intraitables ?

Certes, l'idée nouvelle a toujours été considérée comme hérétique et, comme telle, combattue. Il en sera toujours ainsi car c'est dans la nature humaine et il faut reconnaître que, tant que la vérité n'est pas étouffée par la force de l'autorité, cette résistance est même profitable, bien qu'elle fasse

souffrir les novateurs, sinon l'anarchie s'instaurerait. On raille l'esprit conservateur des Académies, mais elles sont dans leur rôle en endiguant les extravagances ; simplement, il est souvent difficile de faire la différence entre l'extravagance et le génie. « *C'est une idée folle, disait Bohr, mais est-elle assez folle pour être vraie ?* »

Mais ce qui rend la situation actuelle difficilement réformable, c'est que jadis, les idées nouvelles se heurtaient à quelques autorités qui pouvaient s'opposer à la théorie des couleurs de Newton, aux ondes de Fresnel, à l'induction de Faraday, aux équations de Maxwell, à la non-génération spontanée de Pasteur, aux atomes, à la relativité, aux quanta, au photon, à l'onde de de Broglie. Mais contre une autorité, on peut trouver d'autres autorités, tandis qu'aujourd'hui, la foule innombrable qui peuple les laboratoires constitue une opinion publique surmontée d'une structure bureaucratique avec des plans, des projets, des budgets, des lignes de recherche. Comment peut-on y résister ? Un jeune chercheur ne rencontre plus de maîtres, mais des supérieurs ; rencontrera-t-il un Poincaré qui disait à propos d'Einstein :

« On doit s'attendre à ce que la plupart des voies dans lesquelles il s'engage soient des impasses. Mais on doit en même temps espérer que l'une des directions dans lesquelles il s'engage soit la bonne, et cela suffit. C'est ainsi qu'il faut procéder. »

C'est pour cela que la science a besoin de fondations comme la nôtre, qui soient assez libres pour souffler sur une flamme qu'on espère prometteuse et pour prendre des risques en faveur d'une idée nouvelle.

Si les grandes équipes sont nécessaires pour développer les idées acquises, les idées nouvelles germent dans un esprit solitaire, souvent jeune et un peu ignorant, qui avance sans crainte en côtoyant les abîmes avec la candeur du génie.