

## La science comme aventure de l'esprit

GEORGES LOCHAK

Fondation Louis de Broglie  
23, rue Marsoulan F-75012 Paris

J'ai toujours considéré la science comme une aventure de l'esprit dont le but véritable est de proposer une vision du monde, même si celle-ci n'est qu'une toile de Pénélope indéfiniment tissée et retissée, qui peut, à chaque instant, être remise en question par une nouvelle découverte. Tout le reste, en comparaison, est subalterne : le plaisir des problèmes résolus, le succès des applications pratiques ou les menues victoires sur des groupes rivaux. En reprenant un mot de Poincaré, ce qui compte, ce n'est pas de calculer des éphémérides mais de savoir jusqu'où la gravitation universelle est vraie.

Je dois en partie cette conception à la chance d'avoir été élevé dans une famille qui se faisait une haute idée de la science, peut-être parce que les vicissitudes de l'existence en avaient fait un but d'autant plus sacré qu'il était devenu inaccessible. C'est pourquoi je parlerai un peu de mon enfance où tout l'homme est d'avance concentré.

Mon père avait fait de bonnes études de mathématique et de physique en Sorbonne, où il eut de grands maîtres, dont Charles Fabry qui lui inculqua plus que des faits, le *rêve* de la science. Fabry l'avait remarqué et l'invita à venir travailler dans son laboratoire mais mon père, la mort dans l'âme, dut décliner son offre : émigrant venu de Russie, sans soutien familial, il lui fallait gagner sa vie. Il devint ingénieur du bâtiment. Fabry n'avait pas de quoi le payer. Il n'y avait pas de CNRS à l'époque.

Ma mère, elle aussi, venait de Russie et avait vu ses études de biologie interrompues par la révolution, la famine, les épidémies et la guerre civile. Enfin, l'un de mes oncles, son frère cadet, n'avait même pas commencé ses études de chimie. Il les poursuivit à Paris cahin-caha, tout en travaillant. Il créa plusieurs usines de produits chimiques qui prospérèrent grâce à son inventivité et déclinèrent faute de gestion, habité qu'il était par le démon de la recherche et de la remise en cause de ce qu'il faisait.

Cela n'empêcha pas mon enfance d'être bercée par la science. Je me souviens de deux livres vert sombre, édités chez Larousse, l'un s'intitulait : *Le Ciel* et l'autre : *La Science ses progrès et ses applications*. Mon père me les lisait, le dimanche après-midi. Nous étions étendus côte à côte, à plat

ventre sur le "grand lit". Il me racontait aussi des choses en mathématique, parfois incompréhensibles, mais dont je me délectais.

Souvent, mon oncle venait, m'apportant des coffrets pleins de produits chimiques : sachets de poudres ou flacons de liquides colorés choisis pour être sans danger. Nous faisons des expériences dans la cuisine.

Je dois à ces trois personnes, mes parents et mon oncle, ma passion pour la recherche. Plus qu'un fils et un neveu, je renouais pour eux un fil interrompu. J'étais l'incarnation de leurs espoirs. Et, par chance, j'aimais la science autant qu'eux.

Ils ne m'ont jamais gavé de connaissances et m'ont seulement communiqué leur amour du savoir.

Je me souviens de l'Exposition Universelle de 1937 à laquelle mon père travailla avec enthousiasme et de l'ouverture, à Paris, du *Palais de la Découverte*, œuvre de Jean Perrin, soutenue par la fine fleur de la science française : Louis de Broglie, les époux Joliot, Langevin et d'autres.

Mon père m'y emmena comme à la fête. J'avais sept ans et fus l'un des premiers visiteurs. Je n'ai jamais oublié la fascination qu'exerça sur moi l'éclair de cinq millions de volts qui jaillissait dans le hall d'entrée entre deux énormes boules dorées surmontant les hautes colonnes d'une machine de Van de Graaff construite par Joliot. Le public était dans les galeries, protégé par l'immense filet de cuivre brillant comme l'or, d'une cage de Faraday qui enfermait tout le hall.

Je me rappelle le silence enténébré des salles d'astronomie où l'on montrait dans de gros télescopes les images des planètes dont mon père m'avait parlé. Et la petite coupole dans laquelle s'enroulaient en spirale les premières sept cents décimales du nombre  $\pi$ . Presque toutes fausses, paraît-il, mais on les a recalculées. Qu'importe ! De toute façon, je ne savais pas ce que signifiait ce nombre, mais j'étais sensible à sa magie et j'éprouvais pour la première fois le vertige de l'infini quand mon père (je l'entends comme si c'était hier) m'expliqua que les points de suspension qui terminaient l'alignement de chiffres signifiaient qu'ils se poursuivent encore et encore, aussi loin qu'on le veut.

Toute mon adolescence s'est poursuivie ainsi, sauf que je lisais moi-même, bien sûr. Je lisais de bons vulgarisateurs comme Marcel Boll, mais très tôt j'ai pris l'habitude de lire de grands auteurs dans des livres à ma portée mais sur lesquels je peinais davantage, comme Jean Perrin, Louis de Broglie, Emile Borel et plus tard, Einstein et Poincaré. C'était la guerre, je n'étais pas à Paris et les choses étaient plus difficiles mais il y avait la bibliothèque de l'école. Je lisais aussi des livres de classe en avance sur celle où j'étais : en quatrième, j'étais au niveau du bac en chimie (ma grande passion) et de la seconde en physique, avec plus de difficulté à cause des mathématiques où je n'avais pas d'avance.

Et puis la guerre, comme toute chose, a aussi ses bons côtés. Pour moi, ce fut la campagne, ce qui veut dire une remise transformée en laboratoire, où je faisais des expériences de chimie un peu folles, et de grands espaces pour essayer mes fusées propulsées par de la poudre de ma fabrication, le corps étant fait de douilles, fournies par les maquisards, et les mèches, des cordons Bickford données par un entrepreneur de travaux publics chez qui nous habitions.

Dans mes rêves scientifiques de jeunesse, il y eut trois accroc qui valent d'être contés : deux petits et un gros. Voici les deux petits qui sont significatifs :

J'avais treize ou quatorze ans quand mon oncle et ma mère m'expliquèrent l'agitation moléculaire et le mouvement brownien. « A titre d'exercice », ils me posèrent la question classique des deux couches d'encre et d'eau superposées dans un verre, qui se mélangent peu à peu. Je restai muet et pensif jusqu'à ce que ma mère s'impatienta : « Mais enfin, qu'est-ce qu'on vient de t'expliquer ? ». « C'est le mouvement brownien ? » murmurai-je à regret, provoquant l'inquiétude devant ma lenteur d'esprit, ce qui m'humilia profondément. Je savais bien que c'était la réponse attendue, mais j'étais en train de me demander si l'agitation moléculaire dans un liquide n'était pas de trop faible amplitude pour que le mélange se fasse en un temps raisonnable ; mais je ne l'ai pas dit. Des années plus tard, j'ai lu dans un livre qu'en fait, ce sont plutôt les courants de convection qui dominent dans ce phénomène. Ravi, je le racontai à ma mère, mais elle avait oublié l'épisode !

L'autre accroc survint à peu près au même âge. J'étudiais l'électrolyse, les anodes, les cathodes, les ions plus et moins... Et j'appris qu'il y avait des ions  $H^+$ . Or je connaissais déjà l'atome de Bohr et je me dis aussitôt que si on lui enlève un électron il ne reste rien : il y a donc des protons qui se promènent librement dans l'électrolyte. C'était inquiétant. Je m'en ouvris à mon professeur de physique qui me répondit qu'il ne fallait pas confondre un proton avec un hydrogène plus et que, d'abord, ce n'était pas au programme. Cela m'est resté sur le cœur et je ne me suis jamais défait de l'idée que ces ions « solvatés » (comme on me l'a dit plus tard) avaient quand même quelque chose de « nucléaire », que le proton y est plus libre qu'il n'est d'habitude, qu'il est moins repoussé par d'autres dans le milieu plasmatique qu'est un électrolyte et qu'il y a là comme un pont entre la chimie et une physique nucléaire à basse énergie. Quand, des décennies plus tard, Pons et Fleischman ont annoncé leur « scandaleuse » expérience de fusion froide, j'y ai repensé et je n'ai pas crié au loup.

J'ignore toujours ce qu'il y a de vrai, là-dedans, tout comme j'ignore, depuis plus longtemps encore, si j'avais tort ou raison, à dix-huit ans, de m'entêter à essayer de franchir la fine couche d'oxyde qui protège la surface de l'aluminium, seul obstacle, croyais-je, au rêve que j'avais formé d'un

accumulateur extra léger (en raison d'une analogie de valence avec le plomb). Et c'est là que je connus mon troisième accroc, mais celui-ci fut un revirement dans ma vie.

Au cours d'un essai, j'ai trop chauffé un becher d'acide sulfurique. Or j'étais asthmatique et les vapeurs ont provoqué une crise paroxystique dont je mis des mois à sortir. Mon médecin m'a dit gravement, en tête-à-tête, que je ne serais jamais un chimiste normal, étant trop menacé par le moindre accident, et qu'il valait mieux que je change de cap tant que j'avais tout l'avenir devant moi. Ce fut l'un des plus grands chocs de ma vie, que j'évoque douloureusement, encore aujourd'hui.

Je me suis détourné de la chimie comme d'un amour déçu et je n'ai même pas cherché à en suivre les progrès. C'est ainsi que je suis devenu physicien.

Je fis donc, en Sorbonne et à l'Institut Henri Poincaré, des études de physique et de mathématique, retrouvant, en travaux pratiques, des vieux appareils que mon père a dû connaître. J'étais scandalisé, à l'époque, mais à la réflexion, ce n'était pas grave car d'illustres découvertes ont été faites avec moins que cela et que mieux vaut, tout compte fait, de vieux appareils qui forcent à l'habileté que des appareils de cours si parfaits que tous les effets semblent évidents ou, pis encore, des simulations sur ordinateur qui ne sont plus de la physique du tout.

\* \* \*

Hélas, je lisais moins qu'avant, pour une raison qui peut sembler bizarre : c'est qu'aparavant, l'asthme faisait de moi un enfant malade qui manquait beaucoup l'école, ce qui causa un retard dans mes études et laissa quelques trous (ainsi, je n'ai jamais su « mes » départements !) mais ma liberté d'esprit en était préservée. Il faut dire aussi que le cadre scolaire m'ennuyait et que, de ce point de vue, la Sorbonne produisait sur moi le même effet que le cours complémentaire, si bien que, devenu un étudiant comme les autres, je régressai.

Je continuais néanmoins à réfléchir à la physique mais plus en pointillé. Deux choses me tracassaient particulièrement :

1) Le *déterminisme*, auquel j'étais depuis longtemps attaché. Je n'en faisais pas une condition sine qua non de la science dont j'apercevais le vaste champ d'ignorance, mais je pensais que pouvoir dire : « Faites ceci et vous aurez cela » est un idéal auquel la science doit tendre, les prévisions probabilistes étant un pis aller.

2) La *causalité*, autrement dit le fait que la science doit chercher, à mon avis, à expliquer un phénomène en montrant qu'il est rendu nécessaire par d'autres qui se sont produits avant lui (ce qui implique une flèche du temps). Là aussi, il ne s'agit que d'un idéal car on ne saurait oublier que les plus grandes théories modernes n'y satisfont pas, étant basées sur des principes

extrêmeaux, comme les principes de Fermat et de moindre action, qui sont *téléologiques*, puisqu'ils impliquent à la fois le passé et le futur, lesquels peuvent même s'inverser.

\* \* \*

Vu ma conception de la science, qui était celle de la science de toujours, j'étais choqué que la mécanique quantique la remette en question et, plus encore, que Louis de Broglie l'admette. J'avais pour lui la plus grande admiration, je le rangeais parmi les dieux de mon Olympe scientifique et je trouvais cet abandon « indigne » de lui. Disons le mot : je lui en voulais.

Quelle fut ma joie d'apprendre, à la fin de 1952, que, dans une conférence intitulée « La physique quantique restera-t-elle indéterministe ? », il avait annoncé qu'après de longues réflexions, il renonçait aux conceptions en vigueur en mécanique quantique et revenait à celles de sa jeunesse, dont je ne savais à peu près rien malgré les livres que j'avais lus de lui : pour la simple raison qu'il n'en parlait plus.

Sans en savoir davantage, je formai aussitôt le projet de travailler avec lui, sans même me demander s'il le voudrait bien. Il faut dire qu'il m'était soudain devenu plus familier, quelques mois auparavant, car je l'avais rencontré, un jour de printemps, vers midi, dans le hall de la Sorbonne, au pied du Grand Amphithéâtre. J'allais sortir par l'une des portes donnant sur la rue des Ecoles, quand j'entendis un pas dans le hall désert et j'aperçus dans la pénombre, en me retournant, un homme assez âgé mais alerte - un professeur sans doute - qui descendait les marches de la Galerie des Sciences, s'avançant vers la porte que j'allais emprunter. Je m'effaçais en maintenant le battant ouvert, ce qui obligea l'homme à accélérer le pas et créa un léger embarras qu'il dissipa d'un sourire aimable avec un mot de remerciement.

Je l'ai évidemment reconnu dès qu'il s'approcha de moi, et cette rencontre avec celui qui allait jouer un rôle si important dans ma vie, me fit grande impression. Ainsi, il existait autrement que dans les livres ! Et je venais de rencontrer la grande science, celle qui appartient à l'histoire, sous la forme d'un homme bien vivant que je regardais, songeur, s'éloigner d'un pas rapide vers le Boulevard Saint-Michel en passant devant la statue de Montaigne. Il est ainsi des jours peuplés de symboles.

Deux ans plus tard, j'étais dans le bureau de Louis de Broglie à l'Institut Henri Poincaré, accompagné de Jean-Pierre Vigier qui venait me présenter. Bientôt, allait commencer pour moi la vie à l'IHP que j'ai racontée ailleurs (IV, [4])<sup>1</sup>.

\* \* \*

Pendant deux ans, je n'ai pas travaillé directement avec de Broglie mais avec Vigier. Impressionné d'accéder aux étages supérieurs de l'IHP, ceux réservés aux chercheurs, je fus un peu surpris de ce qu'on y faisait et j'ai lancé la plaisanterie que « Tout le monde, dans cet institut, travaille sur l'équation de Dirac, sauf le concierge » (il n'y avait pas de concierge). Le sujet à la mode était la théorie *des fluides relativistes à spin*, dont le but était de trouver une interprétation hydrodynamique de l'équation de Dirac mise sous forme tensorielle. Cette forme s'obtient à partir des formes bilinéaires construites à l'aide du spineur de Dirac et des seize matrices de l'algèbre de Clifford engendrée par les matrices  $\alpha$  ou  $\gamma$ . D'autres s'étaient déjà attaqués à cette écurie d'Augias (le système est assez monstrueux). Citons de Broglie, Pauli, Kofinck, Yvon, Petiau, Costa de Beauregard et, de notre temps, Vigier, Halbwachs, Hillion, moi-même, et surtout Takabayasi qui, à mon avis, a décroché la timbale en mettant sous une forme propre le système tensoriel équivalent aux équations de Dirac. Ce qui ne veut pas dire qu'on a compris pour autant.

Le système obtenu est assez proche de la mécanique des fluides relativistes classiques et, de ce point de vue, il est assez réussi, mais la constante de Planck y joue les trouble-fête et, plus encore, un angle énigmatique, un pseudo-invariant relativiste, que Takabayasi désigne par  $A$  (aucun rapport avec le potentiel de Lorentz). Cet angle  $A$  semble lié aux paires électron-positron et j'ai montré, beaucoup plus tard (nous y reviendrons) qu'il est lié aussi à la présence d'un monopôle magnétique. C'est à cause de ce  $A$  que le système de Takabayasi, malgré son élégance, est un inextricable mélange d'équations, les unes « normales » et transparentes et les autres parfaitement opaques. Bien entendu, algébriquement liées les unes aux autres, aucune n'est de trop.

On cherchait aussi (à l'initiative de Bohm) à décrire la rotation liée au spin à l'aide d'angles d'Euler et je fus le premier, je crois, à écrire l'équation de Dirac en termes d'angles d'Euler relativistes. Le résultat le plus intéressant ([1], [3], [4], [6], [84]) fut que l'impulsion de Dirac prend la forme :  $p_\mu = \hbar/2 (\partial_\mu \chi + \xi^\alpha \partial_\mu \eta_\alpha)$ , où  $\chi$  est l'angle de rotation propre et  $\xi, \eta$  des paramètres dépendant des cinq autres angles d'Euler. A l'approximation non relativiste, la formule se réduit à  $p = \hbar/2 (\chi + \cos \theta \varphi)$  : c'est ce qu'on trouve pour l'équation de Pauli ( $\chi, \theta, \varphi$  sont les trois angles d'Euler). Enfin, si on aligne le spin sur Oz, il reste :  $p = \hbar/2 \chi$ . Autrement dit,  $\chi$  devient la phase de l'onde de Schrödinger et finalement, à l'approximation de l'optique géométrique, elle devient la fonction de Jacobi. Ainsi, on relie cette dernière au spin de l'électron et l'on peut dire que l'intégrale d'action de la mécanique est donc une intégrale sur un angle de rotation propre.

Ce résultat mathématiquement très simple crée une chaîne entre la mécanique quantique relativiste et la dynamique analytique, en reliant la

rotation propre du spin à la phase de l'onde de de Broglie et à l'action de Hamilton-Jacobi. D'où l'idée que la fréquence interne de la particule que de Broglie avait mise à la base de la mécanique ondulatoire est peut-être celle de la rotation propre du spin, qui serait donc une grandeur plus fondamentale que l'onde. J'ai soumis l'idée à de Broglie qui l'a trouvée intéressante mais sans que nous ayons pu aller plus loin.

De ce calcul, on peut retenir trois choses. 1) On comprend pourquoi la constante d'action  $\hbar$  est une unité de moment cinétique. 2) L'invariance de phase des équations quantiques apparaît comme une invariance de rotation. 3) Les équations de Dirac sont mises sous la forme de crochets de Poisson classiques portant sur 8 variables : les 6 angles d'Euler relativistes, une densité invariante et l'angle pseudo-scalaire  $A$  de Takabayasi. Or ces crochets entraînent deux faits remarquables :

a) L'angle de rotation propre  $\chi$  est canoniquement conjugué à la quatrième composante  $j_4$  de la densité de courant de Dirac, ce qui rappelle la cinquième relation d'incertitude d'Heisenberg en électromagnétisme, la relation entre la phase et le nombre d'occupation ; mais ce n'est qu'un "rappel" : n'oublions pas que la particule de Dirac est un fermion.

b) Par un curieux parallélisme, l'angle  $A$  est conjugué à la quatrième composante  $\sigma_4$  de la "densité de spin". Or  $A$  et  $\sigma_4$  étaient très mystérieux à l'époque et leur conjugaison n'arrangeait rien. Nous verrons comment ce mystère s'est éclairci par la suite.

\* \* \*

C'est à partir de ces considérations sur les angles que nous nous sommes lancés dans une classification des particules élémentaires basée sur le groupe des rotations (I, [7], [8]) : ce n'était pas la première et elle ne fut pas la première à échouer. L'idée est séduisante mais trop simple. Pour moi, il en est resté un sujet de Thèse qui, plus prudemment, ne portait pas sur les particules mais sur le groupe des rotations et la toupie quantique (I, [9], [10], [24]). On y trouve notamment :

- Une nouvelle construction, plus simple que l'habituelle, des éléments de matrices des représentations unitaires (les "fonctions sphériques généralisées") ;

- Un théorème à la Dirichlet sur la convergence des séries de telles fonctions ;

- Un nouveau calcul des fonctions propres de la toupie, qui suit scrupuleusement les principes de la mécanique ondulatoire, d'où il ressort que, bien que le spin soit absent de la toupie quantique, celle-ci admet des états de *moment cinétique demi-entier*, dont les transitions avec les états

entiers habituels sont interdites, ce qui pose la question, restée ouverte, de savoir pourquoi on n'observe que les états entiers ;

- Enfin une étude détaillée du théorème d'Ehrenfest pour la toupie montre que seule une certaine moyenne temporelle prise sur les états quantiques tend vers les mouvements classiques : en fait, le théorème ne vaut, stricto sensu, que pour les états de translation et non de rotation.

\* \* \*

Ce travail a été effectué après mon retour d'URSS, où j'ai passé un an, en 1957, à l'Institut Unifié de Recherches Nucléaires de Doubna. Je n'y ai pas travaillé sur la physique nucléaire mais sur les accélérateurs de particules, ce qui a joué pour moi un grand rôle par la suite. Tout d'abord, j'ai fait un certain nombre de travaux sur les accélérateurs, tant là-bas (I, [11]), qu'à Orsay où j'ai passé quelques années à mon retour (I, [21], [22], [25], [28], [32], [33], [34]). Expérience intéressante : c'est la seule fois de ma vie que j'ai fait de la physique à la mode, que j'ai obtenu des succès faciles et qu'on se disputait mes résultats. Mais je m'ennuyais profondément.

Pour moi, l'essentiel de mon séjour fut que j'y ai appris une nouvelle branche de la physique: *la mécanique non linéaire*.

Ce nom est un peu passé de mode, aujourd'hui, mais il était plein de sens à l'époque, car la plupart des physiciens des vibrations et spécialement les physiciens quantistes étaient tellement imbus de la linéarité des équations que la non linéarité paraissait exotique. Les choses ont changé depuis, mais le groupe de Broglie a été l'un des premiers à s'y lancer et j'y fus pour quelque chose : jusque là, seule la relativité générale se permettait d'être non-linéaire, à l'IHP. Pourtant, les deux premiers grands auteurs que j'ai découverts dans ce domaine, à Moscou, étaient Poincaré (qui n'était pas étranger à l'IHP), et Liapounov (dont la célèbre thèse avait été jadis traduite en français à Toulouse) mais tous deux étaient très oubliés en France en ce temps là. Je les ai découverts grâce à N.N. Bogolioubov patron de la physique théorique à Doubna, et à D.I. Blokhintsev qui en était le Directeur général.

J'ai acheté chez un bouquiniste, à Moscou, la traduction russe des mémoires de Poincaré sur *Les courbes définies par une équation différentielle* et je les ai lus passionnément (je ne les ai jamais lus en français !), et j'ai lu non moins passionnément la thèse de Liapounov sur *La théorie générale de la stabilité du mouvement*, puis *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste* de Poincaré (cette fois en français !) et j'ai découvert l'innombrable et brillante école russe d'Andronov, Witt et Khaïkin, de Pontriaguine, Kolmogorov, Tchetaïev, Bogolioubov et tant d'autres. Ma connaissance du russe m'a bien servi. Puis j'ai découvert Birkhoff et d'autres auteurs américains, italiens etc. Et j'ai appris qu'il existait - et depuis



longtemps - des cycles limites, des fonctions de Liapounov, des mouvements centraux, une topologie de l'espace des phases... et j'ai vu que, dans le fond, "non linéaire" n'a pas grand sens, car le monde est évidemment non linéaire. C'est "linéaire" qui a un sens, celui d'un cas particulier très restreint dont il était urgent de se libérer.

Dans mon enthousiasme, il m'est presque tout de suite apparu que le secret des quanta devait se trouver là, que des états discrets isolés ne pouvaient pas exister dans la nature, pas plus que des transitions instantanées "indescriptibles dans l'espace et dans le temps", comme disait Bohr. L'image des cycles limites est tellement plus séduisante : états plus visibles que les autres en raison de leur stabilité et entre lesquels peuvent transiter les systèmes atomiques dès qu'une perturbation les fait sortir du domaine de stabilité d'un cycle limite (i.e. d'un état quantique), exécutant une transition continue mais si rapide qu'elle échappe à l'observation et que nous la croyons instantanée.

*Hélas ! ... Si seulement la nature était aussi belle et aussi simple !*

Sitôt rentré à Paris, je n'eus pas de mal à convaincre quelques amis de s'y lancer (I, [14], [15], [16], [17], [18], [23], [26], [27], [30], [92]). Les encouragements ne nous manquèrent pas : d'abord ceux de de Broglie, puis je reçus une lettre de Norbert Wiener - un baume au cœur - puis un article élogieux de Ter Haar. Puis les encouragements posthumes de Birkhoff qui avait caressé la même idée que nous, ce qu'Andronov avait rapporté lors d'une intervention à un congrès tenu à Moscou en 1931. Ne croyant ni aux états isolés ni aux transitions soudaines, Birkhoff a démontré un admirable théorème qui généralise le théorème du retour de Poincaré et qui dit à peu près ceci :

Sous la seule hypothèse que le portrait de phase (de dimension quelconque) d'un système dynamique reste *confiné à un domaine fini*, les trajectoires se partagent en deux classes : les unes restent confinées à des domaines de dimension moindre que l'espace des phases et obéissent au théorème du retour (ce sont les *mouvements centraux*) ; les autres tendent vers l'un de ces sous-espaces, vers les mouvements centraux. Il n'existe donc que deux sortes de mouvements : un sous-ensemble discret de type hamiltonien (obéissant au théorème du retour) et un ensemble de transitoires qui tendent vers les premiers.

Peut-on trouver plus belle image de la théorie des quanta ? Et comment ne pas croire que si le monde est bien fait, il est fait ainsi ? Mais, nous savons depuis Newton que la vraisemblance et la beauté d'un modèle est un motif d'espoir, non un critère de vérité. Le "juge implacable" comme le disait Einstein, c'est l'expérience. Et pour cela, il faut un modèle précis et des prévisions nouvelles qu'on puisse vérifier.

C'est ce que nous n'avons pas trouvé. Nous avons des tas de modèles astucieux, mais... justement il y en avait des tas, c'est à dire trop.

Pourquoi ? Pour trouver le bon modèle, il faut : soit pêcher à la ligne et avoir de la chance - ce ne fut pas notre cas - soit réduire le champ d'investigation par quelque principe nouveau. Or nous avons cru avoir cette chance : c'était *la thermodynamique de la particule isolée* que de Broglie proposa à peu près au même moment. Une idée, à mon avis, aussi importante que la mécanique ondulatoire ; on trouvera les références dans (I, [53] ; II, [33]). L'idée est de faire se rejoindre en un même sommet, constitué par la limite de l'optique géométrique et l'équilibre thermodynamique, les trois grands principes de minimum, de Maupertuis, de Fermat et de Carnot (en prenant la néguentropie). On réunirait ainsi la mécanique, l'optique et la thermodynamique, achevant l'œuvre commencée par de Broglie dans sa jeunesse, avec l'union de l'optique et de la mécanique.

Les équilibres thermodynamiques étant asymptotiquement stables (car l'entropie est une fonction de Liapounov), l'idée de de Broglie ouvrait la voie à une mécanique quantique généralisée capable de décrire les transitions quantiques en tant que phénomènes continus observables (I, [19], [20], [23], [30], [53], [67]). En introduisant ainsi le cadre strict de la mécanique ondulatoire et de la relativité, cette théorie paraissait fournir à nos idées théoriques générales les principes nouveaux qui lui manquaient.

Eh bien c'était faux ! Nous n'avons pas prévu d'effet nouveau, nous n'avons pas trouvé l'équation qui nous manquait, et la théorie n'a pas eu le déclic des entreprises vouées au succès. Un jour, je pris mon courage et allai le dire à de Broglie en lui suggérant qu'il valait mieux abandonner en attendant une autre idée. Il m'approuva. Je suppose que quelques "spécialistes" ont ricané en constatant cet abandon (qu'ils avaient prévu, sans doute, puisque c'étaient des spécialistes). Quant à nous, nous avons l'impression d'avoir manqué une première sur une face nord, ce qui arrive à d'autres et qui est très honorable. Je reste persuadé que quelqu'un, un jour, trouvera une voie et passera.

\* \* \*

En attendant, quelles sont les retombées de ces efforts ?

1) Nous en avons retiré une meilleure connaissance de la mécanique et de ses liens avec la thermodynamique. Un point fondamental nous est apparu, qui est contraire aux idées dominantes mais que nous défendons contre vents et marées, à savoir qu'on ne peut fonder la mécanique statistique sur la dynamique hamiltonienne, sinon en introduisant "en contrebande" l'irréversibilité qui lui manque. Une façon de l'introduire est l'idée - féconde mais discutable - que la nature irait soi-disant vers les états les plus probables (qu'ils soient les plus faciles à voir, certes, mais que la nature y *tende*, il faudrait expliquer comment) ; une autre façon est l'hypothèse du chaos

moléculaire, *qui n'est pas hamiltonien* ; ou celle du coarse graining (comme si l'irréversibilité provenait de notre manque d'acuité) ; ou encore en limitant les chocs multiples comme dans le théorème H, ou en interrompant la chaîne BBGKY (l'irréversibilité serait due à ce que nous ne savons pas calculer jusqu'au bout) ; ou encore en comptant sur la longueur des temps de retour de Poincaré (l'irréversibilité serait due à ce que le retour tarde trop, bien qu'inéluctable) ; enfin, on peut faire comme Einstein dans la théorie du mouvement brownien ou de la viscosité de l'eau sucrée : on introduit, à travers la loi de Stokes, une *irréversibilité microscopique* due à la viscosité du solvant (I, [85]). *En réalité, il n'y a pas de théorie hamiltonienne du mouvement brownien* : notons qu'on y trouve un théorème H mais il est dû à la parabolicité de l'équation de la diffusion (I, [40]).

Certaines de ces critiques sont anciennes et se trouvent chez Planck, Poincaré, Zermelo, Loschmidt ; et je sais, pour en avoir discuté avec eux, que Thom, Smale, de Broglie étaient d'accord avec nous. Je pense, pour ma part, que quelle que soit la fécondité de la mécanique statistique, elle ne sera sur des rails solides que si l'on admet que l'entropie est une grandeur fondamentale au même titre que l'énergie, *y compris au niveau microscopique individuel*, ce qui n'empêche pas les effets collectifs. Voir : (I, [72], [78], [85] ; II, [6], [19]) et F. Fer : *L'irréversibilité*, Gauthier-Villars.

2) L'autre retombée se trouve dans les méthodes de la mécanique non linéaire (dont celles de Bogolioubov) que j'ai rapportées de Russie et de mes lectures là bas, que j'ai appliquées aux accélérateurs, puis aux *interactions entre la matière et le rayonnement*. Car, entre temps, le *laser était né* et avec lui l'optique non linéaire (le laser lui-même est *auto-oscillant*, donc non linéaire : voir la théorie de Lamb).

Il s'en est suivi de nombreux travaux, seul ou en collaboration (I, [29], [31], [35], [36], [37], [38], [39], [39], [40], [42], [43], [44], [45], [46], [47]). Le point essentiel est que nous sommes sortis des méthodes habituelles avec la *méthode des moyennes résonantes* (I, [38], [43], [74]) qui permet de suivre un système quantique soumis à une onde électromagnétique de fréquence variable dans un large intervalle comprenant une ligne de résonance.

Cette méthode permet de relier entre eux des phénomènes étudiés généralement dans des bandes étroites et dont le lien n'est, pour cette raison, pas évident : par exemple l'enchevêtrement des raies d'émission et de diffusion Raman à la résonance (I, [39]), ou l'émission stimulée comme battement d'une raie d'émission et d'une raie de diffusion combinée du second ordre (I, [41]), ou encore l'identité de nature entre l'effet Autler-Townes et l'effet Raman résonnant (I, [45]).

Chaque fois, on aperçoit d'où proviennent des raies qui forment un doublet à la résonance et qui peuvent être en réalité de nature très différente. Cette complexité finit par mettre en cause la représentation des fréquences

émises ou absorbées, sous la forme de Bohr, c'est à dire d'une différence de niveau entre un état final et un état initial (I, [44]).

Certes, on peut mettre ces fréquences sous la forme d'une *différence entre deux fréquences de Fourier* de la fonction d'onde. Mais les composantes de Fourier ne sont pas des états stables de l'atome entre lesquels pourraient se produire des transitions, car ils ne sont pas solutions de l'équation de Schrödinger, sauf dans le cas conservatif où ils sont des états propres de l'énergie et où, pour cette raison, la loi de Bohr est vraie et s'énonce comme une transition entre états quantiques.

\* \* \*

Le problème est de trouver une définition générale des états quantiques entre lesquels s'effectuent les transitions. Si l'hamiltonien d'un système:  $H = H_0$  est conservatif, on dit que les états quantiques sont les états propres de  $H_0$ . Mais pourquoi ? Pourquoi pas des combinaisons linéaires, comme le voulait Schrödinger, et qui fournissent une infinité d'autres bases de solutions ? Quel est le privilège de ces états propres ?

Et si  $H = H_0 + H_1(t)$ , avec une perturbation dépendant du temps ? Quels seront les états quantiques ? Les composantes de Fourier ne sont pas solutions de l'équation de Schrödinger, mais il y a une infinité de bases de solutions possibles. Et en plus, il est facile de montrer qu'elles sont toutes associées à des valeurs propres de différents opérateurs hermitiens. Mais lequel choisir ?

J'ai pensé alors que si de Broglie avait raison de dire que les états stationnaires, dans le cas conservatif, sont des maxima d'entropie – il s'agit ici de *son entropie cachée* – on pourrait peut-être transposer cela dans le langage de la mécanique statistique habituelle et chercher si cela signifie que ce sont *les états les plus probables* (j'oublie ici les critiques formulées plus haut et je raisonne comme tout le monde).

Or il y a un théorème de von Neumann qui dit cela, dans les *Fondements Mathématiques* (il est énoncé à propos de la mesure) :

*"Pour une même énergie totale, l'entropie de von Neumann d'un mélange statistique d'états stationnaires est plus grande que celle d'un mélange d'états de superposition."*

**Mais cela ne suffit pas** : encore faut-il que ce soit une entropie physique et pour cela, comme il s'agit d'un équilibre thermodynamique, il faut que la distribution d'états stationnaires ne change pas lors d'une variation infiniment lente d'un paramètre du système. Or c'est justement le cas car *les états stationnaires sont invariants adiabatiques*. **C'est cela et seulement cela qui légitime la définition des états quantiques comme états propres de l'énergie. Donc, dans le cas général, il faut chercher un système complet**

**d'états invariants adiabatiques sur la base desquels on calculera une entropie de von Neumann**

J'ai consacré plusieurs années à ces problèmes et la méthode des moyennes résonnantes m'a à nouveau servi. Voir : (I, [48], [49], [50], [51], [52], [54], [55], [56], [57], [60], [62], [63], [64], [65], [68], [69], [70], [71], [73]). En fait, on ne répond à la question posée que pour une *perturbation périodique* : les états recherchés sont les *solutions de Floquet*. **Ces états ont pris le nom d'états permanents** ; ils se raccordent aux états stationnaires avec l'extinction adiabatique de la perturbation.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

1) Le *théorème d'invariance adiabatique* des états permanents (I, [48]), en tenant compte des dégénérescences, mais pas des têtes de séries spectrales, autrement dit les points d'accumulation. Ce dernier problème été résolu par Pierre Lochak qui a également démontré le cas beaucoup plus difficile où un champ extérieur change le spectre discret en spectre continu, et élargit les raies en petites bandes (autoionisation) : on montre alors que *les bandes restent invariantes adiabatiques à l'échelle de leur durée de vie*. Ce théorème est donc aussi un théorème de *stabilité de structure*.

2) Une expérience de jet moléculaire (dirigée par J.G. Théobald) a établi *l'existence* des états permanents, leur *adiabaticité*, les *transitions* induites entre eux par un champ extérieur, et leur *raccord* avec les états stationnaires (I, [49]).

3) Un *effet de transparence* sur une fréquence d'absorption, obtenu par un glissement adiabatique de fréquence (I, [52]). L'expérience reste à faire.

4) Les objets statistiques d'un ensemble perturbé par une onde cohérente étant définis par les états permanents, on construit dessus une thermodynamique de von Neumann (I, [55]) qui permet des prévisions statistiques.

5) Les états permanents sont définis de façon unique et ont une signification intrinsèque malgré la non univocité de la transformation de Floquet (I, [56]).

6) En application de la thermodynamique de von Neumann, on justifie (ce qui n'avait jamais été fait auparavant) le concept de température de spin dans le référentiel tournant en RMN : c'est la température statistique définie sur les états permanents. Le référentiel tournant est une approximation du référentiel de Floquet (I, [57]).

7) L'exposé général de la théorie se trouve dans (I, [60], [65], [73]).

Un point essentiel est que les états permanents sont associés aux valeurs propres d'une intégrale première, **l'énergie réduite**, qui figurent dans les fréquences spectrales et dans la loi de Gibbs de la statistique des systèmes

perturbés ; l'énergie réduite tend vers l'énergie du système conservatif quand on éteint la perturbation.

Toutefois, on remarque que les états permanents ne sont pas définis à partir des valeurs propres de l'énergie réduite, mais à partir d'une condition d'adiabaticité. En effet, comme le système dépend du temps, il en est de même pour ses intégrales premières dont aucune ne se détache comme le fait l'hamiltonien d'un système conservatif, pour définir l'énergie. C'est la condition d'adiabaticité qui permet de définir l'intégrale première de l'énergie réduite, mais c'est une condition empruntée au second principe de la thermodynamique et non au premier.

**On voit que le second principe occupe la première place et que le premier s'en déduit, contrairement à l'ordre habituel en mécanique statistique (I, [73]).**

Or on peut remarquer que, même pour les systèmes conservatifs, ce n'est pas parce que l'hamiltonien semble "évident" qu'il doit représenter l'énergie. L'œil d'aigle de Poincaré ne s'y est pas trompé et il a mis ce choix en doute, mais il l'a justifié en montrant qu'en mécanique classique, *l'hamiltonien est la seule intégrale première uniforme* (voir : "Méthodes Nouvelles"). En réalité, je ne crois pas que cette raison soit suffisante. Il faut encore que cette définition hamiltonienne de l'énergie s'accorde avec la définition de l'entropie. Or c'est le cas, puisque *le volume de phase enfermé dans une surface d'énergie est un invariant adiabatique* et c'est cela, à mon avis, qui est le vrai critère pour le choix de l'énergie, comme en mécanique quantique (*mutatis mutandis*).

J'ai trois anecdotes à propos des états permanents que je voudrais raconter :

1) Norbert Wiener, dans la lettre qu'il m'avait adressée, me disait que je devrais introduire, dans la théorie des transitions quantiques, le principe d'invariance adiabatique. Sur place, je n'ai pas compris pourquoi il me disait cela mais, étant donnée la signature, je l'ai gardé en mémoire. Finalement, il avait raison.

2) Louis de Broglie a connu évidemment depuis le début les travaux dont je parle. L'une des première fois que je lui en ai parlé - il avait 80 ans et dominait encore toute la physique - il m'a fait, en me quittant, un compliment qui m'a impressionné : *"C'est dommage qu'Einstein soit mort, ça l'aurait certainement intéressé"*. Je pense qu'il avait raison mais je pense aussi que, si Einstein s'était emparé de cette idée, il en aurait tiré dix fois plus de conséquences que moi !

3) Beaucoup plus tard, de Broglie avait 90 ans et ses forces l'avaient en grande partie quitté, avec des hauts et des bas. Comme je l'ai trouvé, un jour, l'esprit visiblement aiguisé j'ai voulu lui exposer mes vues d'ensemble. Pour ne pas le fatiguer, je m'en tenais aux idées générales en m'efforçant de me hisser à sa hauteur, au niveau des grandes lois. Et soudain, presque sans y

penser, je lui ai fait la remarque que je viens de faire sur les principes de la thermodynamique, mais cette idée ne m'était encore jamais venue à l'esprit. Or je la crois importante et je tiens à souligner qu'elle m'a été inspirée par la seule présence de mon illustre interlocuteur qui m'écoutait silencieusement. Des circonstances analogues devaient se répéter peu après avec René Thom, dans d'autres conditions.

\* \* \*

Je dois maintenant citer un intermède qui ne m'a valu que des ennuis et une perte de temps : je veux parler de l'*inégalité de Bell*. Dans l'esprit de son auteur, elle devait être satisfaite par toute théorie "locale" à paramètres cachés, la non localité étant une prétendue caractéristique de la mécanique quantique, ce que je conteste : en fait, la mécanique quantique est locale tant qu'on suit ses principes et qu'on ne lui demande pas de répondre à des questions déterministes individuelles, pour lesquelles elle n'est pas faite (I, [66]). On peut déplorer qu'elle n'y réponde pas, mais on ne saurait la rejeter pour autant, pas plus qu'on ne saurait en déduire que ces questions n'ont pas de sens et qu'on n'a pas le droit de les poser.

Le problème de Bell est né de la polémique engendrée par la tentative de de Broglie de faire apparaître la *position* de la particule dans l'onde (théorie de la double solution). Comme la position est absente de l'actuelle théorie, c'est un *paramètre caché*, chose banale en physique où l'on s'en est toujours servi : les atomes, l'éther, les champs, les potentiels, le neutrino, les quarks, sont ou ont été des paramètres cachés. Mais le paramètre introduit par de Broglie a déclenché une guerre de religion et une querelle byzantine sur le thème : "Y a-t-il des paramètres cachés *en général* ?"

Cette question n'a pas de sens car, pour répondre, il faut définir les paramètres et donc, en fait, proposer une théorie. Si la réponse est "non", c'est que la théorie est mauvaise mais la réponse n'est pas générale, car elle ne concerne qu'une théorie particulière ; et si la théorie est bonne, la réponse est "oui", c'est un "théorème d'existence", mais seule cette théorie nous intéresse et la réponse générale n'a plus d'intérêt.

L'inégalité de Bell a évidemment une hypothèse cachée ainsi que je l'ai montré (I, [61]) : on ne peut pas démontrer un théorème sans hypothèse. Or cette hypothèse viole le schéma statistique de la mécanique quantique dans des cas où celle-ci a certainement raison car on a fait les tests en physique atomique, domaine où la mécanique quantique est reine : c'est comme si la mécanique statistique avait voulu battre la thermodynamique classique sur la machine à vapeur ! On pouvait donc être sûr a priori que l'expérience démentirait l'inégalité et c'est ce qui est arrivé. Je m'étonne que certains en aient été impressionnés, ils devaient bien mal connaître les principes de la mécanique quantique, même s'ils en étaient usagers.

Je suis sûr que si l'inégalité de Bell avait été exposée à l'IHP devant le brillant Séminaire de Broglie des années cinquante, plusieurs mains se seraient aussitôt levées pour dire que c'était faux.

Le démenti expérimental de l'inégalité de Bell ne fait donc que confirmer la fausseté de l'hypothèse cachée sur les statistiques, ce qui était évident a priori et ne prouve rien quant aux paramètres cachés en général et quant aux autres théories, en particulier celle de de Broglie. Mais celui-ci craignait, bien avant les expériences, qu'on ne retourne l'affaire contre lui, ce qui n'a pas manqué. Se sentant âgé, il ne voulait plus être en première ligne et m'a demandé de répondre à sa place. C'était une corvée (la première qu'il me demandait !). Je ne pouvais qu'accepter, surtout qu'on venait de créer la Fondation Louis de Broglie destinée à poursuivre son œuvre et à devenir un centre de discussion sur les problèmes fondamentaux de la physique. Or j'en étais l'initiateur et on m'avait nommé Directeur de la Fondation.

J'ai donc fait de multiples interventions dans des colloques et des revues, avec la pénible impression d'enfoncer des portes ouvertes, alors que la plupart des autres les voyaient fermées, restant engoncés dans leurs a priori, de quelque bord qu'ils fussent. Voici les références : (I, [58], [59], [61], [66]) ; (II, [1], [3], [4], [7], [13], [15], [17], [19]). La principale est [61].

La surdité quasi générale que j'ai rencontrée était pénible. Les gens n'aiment pas que l'on jette un froid dans un débat en disant que « le roi est nu » : c'est hors sujet ! Presque tout le monde m'a rejeté : les contempteurs de de Broglie voyaient en moi son haïssable suppôt et les partisans des paramètres cachés voyaient en moi un "traître". Mon scepticisme affiché troublait la complicité feutrée des joutes auxquelles les uns et les autres se livraient ; or tous tiraient avantage de ce groupe savant qui refaisait le monde avec les faveurs de journaux « distingués » qui peaufinaient leur image intellectuelle en s'en faisant écho. Et pour certains, ce débat quelque peu philosophique était un moyen plus aisé que la recherche scientifique pour parvenir à une certaine notoriété.

Encore un mot. Pourquoi n'ai-je pas parlé du *paradoxe EPR* ?

Parce que je pense que c'est un autre problème et que l'inégalité de Bell est fautive pour des raisons étrangères à la localité (voir réf. cit.). En outre, je ne crois pas à la vertu des paradoxes. Ce ne sont, à mon avis, que des curiosités scientifiques qui peuvent attirer l'attention sur quelque point délicat, mais je ne crois pas qu'ils aident à réorienter une théorie ou à résoudre un problème. Souvent, ce ne sont que des armes de polémique. En outre, toutes les théories ont leurs paradoxes : la mécanique classique, la mécanique statistique, l'électromagnétisme, la théorie de la diffusion, la relativité et, bien sûr, la mécanique quantique. Sans doute parce que la physique n'est pas aussi logique qu'on aimerait le croire. Du reste, *on ne répond pas aux paradoxes* : on les oublie au profit de ceux des nouvelles théories.



Il est intéressant de signaler que, dans sa controverse avec l'Ecole de Copenhague, de Broglie citait des paradoxes, mais pas le paradoxe EPR. Il m'a expliqué (je crois qu'il ne l'a pas écrit), que ce paradoxe lui paraissait peu intéressant parce qu'il mélange deux problèmes : celui des statistiques et celui des systèmes de particules, ce qui, à son avis, ne fait que brouiller les cartes.

Ajoutons enfin que, si beaucoup m'ont rejeté, au cours de cette discussion, ce ne fut pas le cas des trois principaux protagonistes : John Bell, Abner Shimony et Olivier Costa de Beauregard, dont j'ai conquis ou conservé l'amitié à cette occasion et à qui je tiens à rendre hommage. Deux d'entre eux me font l'honneur de participer à ce livre. Hélas, John Bell nous a quittés (II, 30), mais je me souviens avec émotion de la visite qu'il me fit à mon domicile pour essayer de me convaincre et pour me dire qu'il admirait Louis de Broglie et partageait l'essentiel de ses idées. Je garde de lui le souvenir d'un homme intelligent, franc, sincère et rêveur. S'il revenait parmi nous, je suppose que notre dispute reprendrait, mais sans querelle car il était mesuré et avait le respect de l'opinion d'autrui.

\* \* \*

Revenons à mon itinéraire scientifique. En 1982, j'ai été invité au colloque de Cerisy, *Logos et Théorie des Catastrophes*, en l'honneur de René Thom. J'ai fait une conférence sur *La géométrisation de la Physique* d'où est sorti un livre avec le même titre (III, [5]). Et il m'est arrivé la même chose qu'avec de Broglie et l'entropie.

J'ai parlé de l'équation de Dirac en soulignant qu'en raison de sa structure, tant qu'on ne quittera pas son domaine explicatif, on devra admettre l'exactitude de toutes les relations qui s'en déduisent et chercher à les expliquer. Car elles sont liées entre elles et on ne saurait en rejeter une sans rejeter la théorie tout entière, ce qui équivaldrait à admettre que ses succès seraient dus au hasard !

Comme exemple positif, j'ai cité les solutions à énergie négative, d'abord considérées comme une tare de la théorie, mais qui, finalement, firent sa gloire avec la découverte des antiparticules. Comme exemple pour l'instant négatif, j'ai cité la curieuse conjugaison canonique de l'angle  $A$  avec la quatrième composante  $\sigma_4$  de la "densité de spin" que j'avais trouvée vingt-cinq ans avant et dont j'ai parlé au début.

J'ajoutai, en m'adressant du regard à Thom, assis devant moi, que j'étais persuadé que cette relation a un sens ; quand j'eus soudain une illumination et, tout en poursuivant mon exposé, j'ai réalisé que le parallèle entre cette relation et celle qui relie l'angle de phase à la quatrième composante  $j_4$  de la densité d'électricité signifie simplement que  $A$  est un angle de phase pseudo-

scalaire, que le pseudo-vecteur  $\sigma_\mu$  est une densité de courant magnétique et qu'il y a donc un *monopôle magnétique* dans l'équation de Dirac.

L'exposé de Thom suivit le mien, mais je ne l'écoutais plus : je calculais au dos de mes notes, confirmant à l'évidence mon idée à laquelle j'ai consacré une bonne partie des quinze années suivantes : (I, [75], [76], [77], [79], [80], [86], [88], [89], [92], [95], [96], [98], [99]). En résumé, voici ce dont il s'agit.

L'angle  $A$  est un angle polaire dans un *plan chiral* défini par les invariants de Dirac  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ . Comme  $\Omega_2$  est pseudo-scalaire, il en est de même pour  $A$ . La relation que j'avais trouvée entre  $A$  et  $\sigma_4$  signifie que, de même que l'invariance de l'angle de rotation propre entraîne la conservation du courant électrique  $j_\mu$ , l'invariance de l'angle  $A$  entraîne la conservation de  $\sigma_\mu$  qui est donc un courant magnétique.

Mais, tandis que l'invariance de phase est toujours vraie, l'invariance de  $A$  n'est vraie que pour  $m_0 = 0$ . *Le monopôle en question est donc de masse nulle*, à l'encontre des monopôles lourds généralement étudiés. Mais pourquoi est-ce un monopôle ?

Parce qu'on se trouve devant deux jagues euclidiennes invariantes, l'une scalaire, l'autre pseudo-scalaire et deux courants, l'un polaire, l'autre axial, et qu'ils ont la symétrie de l'électricité et du magnétisme.

On voit apparaître automatiquement, dans l'équation, les pseudo-potentiels électromagnétiques de Cabibbo et Ferrari liés au monopôle.

En représentation de Weyl, l'équation se scinde en deux (grâce à  $m_0 = 0$ ) : l'une correspond à un monopôle gauche, l'autre à un monopôle droit.

Le pseudo-courant  $\sigma_\mu$  se conserve (grâce à  $m_0 = 0$ ). En fait, on a deux courants isotropes conservatifs - gauche et droit - dont la somme est égale à  $j_\mu$  et la différence à  $\sigma_\mu$ . *Je pense que ces courants isotropes sont les courants fondamentaux et que  $j_\mu$  et  $\sigma_\mu$  ne font qu'en découler.*

Pour le problème de Kepler, l'équation donne le résultat connu pour un monopôle.

On retrouve la relation de Dirac entre charges électrique et magnétique comme conséquence de la continuité des fonctions d'onde. La charge  $g$  du monopôle est donc un multiple  $g = ng_0$  d'une charge fondamentale.

L'approximation de l'optique géométrique redonne l'équation classique de Poincaré.

L'anti-monopôle est le P-symétrique du monopôle, comme l'anti-neutrino est le P-symétrique du neutrino : de même que le positron est un électron qui remonte le cours du temps, l'anti-monopôle est l'image d'un monopôle dans un miroir.

Si on annule la charge magnétique ( $n = 0$  dans  $g = ng_0$ ), les équations gauche et droite se réduisent aux équations du neutrino et de l'anti-neutrino. D'où l'hypothèse : *les interactions faibles pourraient s'accompagner de l'émission de monopôles de différentes charges  $g = ng_0$ , dont les neutrinos seraient le cas particulier  $n = 0$ . Ce pourrait être le cas sur le soleil, d'où une explication possible du magnétisme des taches solaires et du déficit des neutrinos captés sur terre, les monopôles étant arrêtés à la surface du soleil par les charges électriques avec lesquelles ils interagissent fortement.*

#### **Peut-il exister des monopôles avec masse ? Oui, et de deux façons.**

En effet, le terme de masse linéaire de l'équation de Dirac brise la symétrie chirale, c'est-à-dire l'invariance par rapport à  $A$ , mais :

- On peut introduire un terme de masse non linéaire fonction de la norme du vecteur chiral :  $\rho^2 = (\Omega_1)^2 + (\Omega_2)^2$ , qui, par définition, ne dépend pas de  $A$ . On montre que c'est encore un monopôle et l'on retombe sur une classe d'équations étudiée par plusieurs auteurs, dont Hermann Weyl, bien sûr en dehors de la théorie du monopôle (I, [75], [76], [77], [96]). Le terme non linéaire en  $\rho^2$  définit une *torsion* de l'espace liée au magnétisme. Il apparaît en outre que l'équation possède des solutions *tachyons*, qu'on ne cherchait absolument pas.

- L'autre façon de trouver un monopôle avec masse est de remarquer qu'il existe des solutions monopôle dans l'équation de Dirac habituelle. En effet, pour rétablir l'invariance de  $A$ , brisée par la masse, il suffit de prendre la classe de solutions telle que  $\rho^2 = 0$ , autrement dit,  $\Omega_1 = \Omega_2 = 0$ . En effet, si le vecteur chiral est nul, l'angle polaire  $A$  est indéterminé et on retrouve l'invariance.

Mais cette condition rend les courants électriques et magnétiques *isotropes*. Ce qui revient à *prendre l'équation de Dirac sur le cône de lumière*.

**Or on peut montrer que la condition en question équivaut à la condition de Majorana.** On sait que celui-ci visait à une représentation conjointe de l'électron et du positron. Les interactions électriques montrent qu'en réalité, l'intrication des charges est beaucoup plus compliquée (I, [80]). Mais les interactions magnétiques montrent qu'il y a bien un monopôle dans l'équation de Dirac avec masse (I, [89]).

Pour terminer sur le monopôle magnétique, ajoutons encore deux points:

J'ai pu montrer que, dans la théorie de la lumière de de Broglie, basée sur la méthode de fusion, il n'y a pas un, mais deux photons. Le premier est celui que donne de Broglie, que j'appelle le *photon électrique*. Il correspond aux équations de Maxwell habituelles, complétées par un terme de masse. Mais de Broglie n'a envisagé qu'une seule manière de présenter ses équations. Or il en existe une autre (et une seule) avec une autre symétrie. C'est le *photon magnétique* (I, [95]), qui correspond à l'interaction électromagnétique d'un monopôle et aux potentiels de Cabibbo et Ferrari. Ce photon restait caché dans la théorie. J'ai montré en outre (I, [6]) que, dans la *théorie du graviton de spin 2* de de Broglie-Tonnelat, théorie unitaire qui rassemble le graviton et le photon, le photon est un *photon magnétique*.

Dans deux longs mémoires (I, [98], [99]) j'ai étudié les symétries PTC dans les équations spinorielles. Le premier concerne les équations linéaires (électrique ou magnétique). Et c'est la première fois que les symétries ne sont pas basées sur la covariance formelle des équations quantiques mais sur des expériences d'électromagnétisme, à la manière de Pierre Curie : ce n'est qu'après, qu'on remonte aux équations. On trouve ainsi deux transformations T entre lesquelles il faut choisir et c'est l'expérience qui tranche. Ensuite, on étudie en détail la différence de symétrie entre l'électricité et le magnétisme.

Le second mémoire traite des équations non linéaires d'Heisenberg, Finkelstein, Rodichev, et les miennes propres (liées au monopôle) qui appartiennent à une même famille d'*équations invariantes chirales*. Elles sont P et T invariantes mais violent la C-invariance et donc le théorème PTC. Elles possèdent des paires monopôle-antimonopôle, mais pas de paires particule-antiparticule C-conjuguées au sens de Dirac ; elles peuvent posséder des solutions avec les deux signes de l'énergie et des paires T-conjuguées, ce qui est différent de la C-conjugaison.

On indique une équation spinorielle curieuse : « *le petit monstre* », très simple, covariante relativiste mais qui viole les trois symétries P, T, C. Et surtout, on montre que, d'une manière générale, **les équations non linéaires violent la loi de Planck, qu'elles propagent des ondes qui ne sont pas des ondes de de Broglie et que leur limite à l'optique géométrique n'est pas la mécanique classique. Autrement dit, la mécanique quantique est, dans ses principes mêmes, une théorie linéaire.**

\* \* \*

Derniers travaux, au moment de finir cet exposé : (I, [100], [101]) ; le premier des deux s'appuie sur (I, [87]). L'un et l'autre concernent deux problèmes chers à Louis de Broglie : l'équivalence des principes de moindre action et de Fermat et la jauge du champ électromagnétique. Dès sa thèse, de Broglie montrait qu'en présence d'un *potentiel magnétique*, une particule chargée se comporte comme dans un cristal uniaxe : sa longueur d'onde s'écrit :  $\lambda = h / |mv + eA|$ . Cette formule (qui n'est pas invariante de jauge) n'a encore jamais été vérifiée expérimentalement.

Dans (I, [100]), je propose une telle expérience, qui montrera, en même temps, qu'un potentiel **A** peut agir sur les interférences électroniques même si, dans toute la zone enveloppée par les trajectoires électroniques, le potentiel **A** est un champ de gradient. Cette expérience attend sa réalisation.

Dans (I, [101]), nous montrons, avec O. Costa de Beauregard, que ce résultat peut également être atteint en modifiant une expérience de Tonomura, qui a introduit un tore magnétique dans une expérience d'Aharonov-Bohm, afin de réduire les fuites d'induction. Il faut dire que l'expérience précédente (I, [100]) utilise elle aussi des tores de Tonomura, mais ils sont disposés de manière telle que les trajectoires électroniques ne peuvent envelopper aucune ligne d'induction, même si elle se trouve enfermée dans un tore « autistique ».

\* \* \*

Pour terminer, je veux dire quelques mots de la *Fondation Louis de Broglie* (voir : III, [4] ; IV, [1], [7], [8]) et du *Séminaire de l'Académie* dont elle est le prolongement.

Louis de Broglie créa ce séminaire quand il prit sa retraite en 1962, en ne gardant avec lui que quatre ou cinq membres du *Séminaire de l'IHP* qu'il avait dirigé pendant quarante ans et qui cessa assez vite d'exister après lui. Le nouveau séminaire ne fut guère élargi car de Broglie avait horreur des assemblées nombreuses, mais on y recevait des invités ; il dura douze ans et fut le noyau d'une Equipe de Recherche Associée au CNRS. Je suis le seul à en avoir suivi les travaux de bout en bout. Les autres se sont égaillés selon leurs carrières. La composition a donc changé au fil des années.

J'ai appris, dans ce séminaire, plus de physique que pendant tout le reste de ma vie. J'en ai surtout conservé *l'altitude* car, sans partager, hélas, le génie scientifique de notre maître, je partageais au moins l'idée qu'il se faisait de la science. Tout cela reste un de mes plus beaux souvenirs scientifiques, si beau qu'il fut responsable de mon radical échec dans l'enseignement supérieur. Car, dans les quelques universités où je me suis

montré, mon refus candide (à seule fin de garder le contact avec de Broglie) de m'installer dans une autre ville, anéantissait l'effet de mes recommandations et rendait vaine toute tentative. J'ai donc raté mon entrée dans l'enseignement supérieur, ce dont je fus soulagé, et en 1968 j'ai même trouvé que c'était un trait de génie !

Ce qui était merveilleux, dans ce séminaire, c'était la hauteur de vue des discussions et la liberté qui y régnait, avec une familiarité de bon ton. Les discussions étaient toujours animées, parfois entrecoupées d'éclats de rire. On avait le droit de tout dire et les idées les plus inattendues étaient examinées avec soin. Tout pouvait être mis en doute. Quand j'ai dit à de Broglie que je croyais que le spin était plus fondamental que l'onde, il ne fut pas scandalisé, il mit huit jours pour me répondre (il tardait souvent ainsi), mais ce fut pour me dire que j'avais peut-être raison.

Nous étions loin de l'atmosphère solennelle et guindée du Séminaire de l'IHP. Nous retrouvions le Louis de Broglie de sa jeunesse qui avait dépouillé pour nous la statue de marbre figée dans sa timidité que tout le monde connaissait. Toujours de plain-pied avec chacun, il n'affectait ni supériorité envers nous, ni humilité envers les plus grands.

Quelle que fût son admiration pour Einstein, ce n'était pas un dieu, pour lui, sinon un dieu familier, un dieu lare, qui disait même des bêtises, parfois (quand il n'était pas d'accord avec lui, bien sûr !). S'il parlait de Newton - dont un immense portrait lui faisait face - c'était avec déférence, mais familiarité : il était de son temps, en fait il était du temps de tout le monde. Il ne se gênait pas pour dire que Descartes, malgré son génie, «se trompait à peu près sur tout en physique». Il traitait Fresnel avec affection, comme un frère (en plus, ils étaient du même village<sup>3</sup>). Il potinait gentiment sur Planck tout en disant qu'il avait fait la plus grande découverte du siècle. Schrödinger était évidemment son égal ; Heisenberg aussi, sauf qu'il était « de l'autre côté » mais nul n'est parfait. Il ne disait pas « Jean Perrin », mais « Monsieur Perrin » parce qu'il l'avait connu; mais il disait « Langevin », sans Monsieur, je ne sais pas pourquoi.

Mais surtout, la physique prenait toujours avec lui une dimension cosmique (métaphoriquement parlant car il ne parlait jamais du cosmos, « ce n'était pas [son] domaine », ce qu'il disait aussi de la religion). La physique, pour lui, était là pour proposer une vision du monde. Les problèmes particuliers n'avaient de sens que s'ils y contribuaient, ils n'étaient là qu'en tant que facettes d'une réalité plus vaste et plus globale. Pourtant, de Broglie s'intéressait au moindre détail d'un appareil, d'une expérience, d'un objet. Il invitait souvent à notre séminaire des expérimentateurs et des ingénieurs (on en recevait plus que de théoriciens !). Tous étaient ravis et honorés d'être là et d'être écoutés avec autant d'attention.

Ils ne pouvaient pas toujours se rendre compte de la pierre que chacun d'entre eux apportait à un édifice plus grand, mais plus épuré et plus simple

que le problème particulier qu'ils exposaient. Mais de Broglie n'était pas avare d'explications et dès qu'il était compris, on voyait s'éclairer, à la fois son visage et celui de ses interlocuteurs, heureux de voir leur travail valorisé. Il n'était pas rare, aussi, que nous recevions la visite de physiciens de divers domaines qui venaient exposer des idées parfois éloignées de leur travail quotidien, mais auxquelles ils tenaient et qu'ils ne pouvaient pas exposer dans leur propre laboratoire. Ces idées étaient rarement bonnes, hélas, car les idées nouvelles sont presque toujours mauvaises. Les *vraies idées* sont rares et c'est pourquoi elles deviennent célèbres.

C'est avec Louis de Broglie que j'ai appris ce que le mot « idée » veut dire. Une idée, ce n'est pas une remarque astucieuse qui arrange une expérience ou une équation. Avoir une idée, c'est poser une nouvelle question sur la nature des choses, c'est découvrir une autre face de la réalité, c'est émettre une pensée après laquelle on voit le monde autrement, et qui soulève plus de problèmes qu'elle n'en a résolus. De telles idées, Louis de Broglie en a émis une et Einstein s'en reconnaissait deux.

Pourtant, « *Raffiniert ist der Herr Gott aber böshaft ist Er nicht* », disait-il : « Dieu a de la ruse, mais Il n'est pas méchant ». Il est donc permis d'espérer.

### **Et la Fondation ? J'en ai proposé le projet à Louis de Broglie pour ses quatre-vingts ans afin de pérenniser le Séminaire de l'Académie.**

Ce que je viens de dire du Séminaire caractérise la Fondation mieux que ne le font les statuts et les déclarations officielles : c'est avant tout un lieu de libre discussion où l'on regarde la physique de plus haut avec pour seule loi le respect du droit de chacun de se demander si la nature, après tout, n'est pas faite autrement qu'on ne le croit.

Cela étant, la Fondation a été créée avec un but : qui est de poursuivre l'œuvre de Louis de Broglie. Certes, on ne poursuit pas indéfiniment l'œuvre de quelqu'un, même éminent, car les idées géniales jaillissent toujours d'une direction inattendue ; on ne peut pas toujours suivre le même sillon. En revanche, on peut longtemps poursuivre une ligne d'idées, comme l'ont été, pendant des siècles, les idées d'atome et d'onde qui ont fini, après maintes métamorphoses, par s'unir dans la synthèse de Louis de Broglie. En fait, poursuivre son œuvre, c'est aller dans le sens de cette *image du monde* : un « *Weltbild* », comme il le disait souvent, en glissant dans la conversation le mot allemand qu'il accompagnait inévitablement du nom de Max Planck.

Il est bien normal que les idées de de Broglie conservent dans sa fondation la première place, ce qui est d'autant plus important que ses idées ne sont pas dans le courant dominant et qu'il faut les sauvegarder par devoir de mémoire car, même momentanément oubliées, elles peuvent ressortir, comme cela

arrive assez souvent dans l'histoire des sciences. Certaines d'entre elles ont en outre des chances de prolongement immédiat, pourvu qu'on s'y attache.

La simple lecture de de Broglie est d'une valeur irremplaçable par sa clarté d'esprit, son style limpide, sans mots inutiles, dans lequel il exprime des vues profondes sur toutes les branches de la physique, en donnant sous une forme élégante et succincte des explications qui souvent ne se trouvent nulle part ailleurs. Et surtout, il y a partout, chez lui, sous-jacente ou explicite, sa vision du monde.

C'est d'autant plus précieux en un temps où les questions fondamentales se diluent, se vulgarisent et s'oublient, où beaucoup d'ouvrages transforment les questions les plus incertaines en postulats prêts à porter, détournant les yeux des coins obscurs de la physique pour ne livrer que des recettes ou des clés universelles, visant à résoudre tous les problèmes.

C'est pourquoi les expériences actuelles, même les plus remarquables, ne sont le plus souvent que des exploits techniques qui réalisent ce qui n'était encore naguère que des expériences de pensée, mais sans sortir du cercle d'idées créé au premier quart du siècle.

De même, les théories issues de milieux plus éthérés, ne sont le plus souvent que des arborescences de la mécanique quantique, qui la ré-expriment dans des langages mathématiques de plus en plus généraux ou qui l'enrichissent de nouveaux modèles mais sans guère de chance, me semble-t-il, de s'évader hors du cadre de pensée actuel.

Quant à moi, je reste persuadé que la prochaine grande idée sortira d'un esprit solitaire, à l'écart des modes, et s'exprimera en des formules simples, physiquement mystérieuses mais mathématiquement élémentaires : la complication formelle ne vient qu'après, je ne crois pas qu'elle soit source d'inspiration physique.

Cela étant, c'est mon credo personnel, ce n'est pas celui de la Fondation dont la règle plus générale est celle des groupes de montagne : viser les sommets par les voies les plus claires, ce qui relève, en définitive, de la conscience de chacun. C'est cela, finalement, l'aventure de l'esprit. Nous avons eu la chance de la voir incarnée successivement par deux grands présidents, un physicien et un mathématicien : Louis Néel, que nous venons hélas de perdre, et René Thom, mathématicien éminent, mais philosophe dans l'âme, passionné des sciences de la nature.

\* \* \*

Il me reste, Chers Amis, la tâche la plus agréable et la plus simple : celle de vous remercier. Vous êtes nombreux à avoir participé à ce livre, chacun s'exprimant dans le domaine qui lui est cher, certains évoquant des problèmes sur lesquels nous avons collaboré, d'autres poursuivant une discussion entamée depuis des lustres ou témoignant d'une orientation



différente de la mienne. Vous avez tous raison : c'est cela la science vivante et je vous suis à tous chaleureusement reconnaissant.

Et tout cela n'est pas fini, j'espère (à suivre).

---

<sup>1</sup> Cette notation évidente se rapportera, par la suite, à ma liste de publications.

<sup>2</sup> Jean Perrin avait fait cette remarque dans la première édition des *Atomes*, mais elle fut supprimée par la suite : on la trouve dans l'édition en "Livres de Poche" chez Gallimard.

<sup>3</sup> N'oublions pas que Fresnel est né à Broglie, en Normandie.