FONDATION

Louis de Broglie

☎ :01.40.02.00.08 🖷 01.40.04.97.07
e-mail : inst.louisdebroglie@free.fr
http://www.FondationLouisdeBroglie.org

Siège social :
Académie des Sciences
23, Quai de Conti – 75006 Paris

Bureaux, bibliothèque, correspondance
23, rue Marsoulan F – 75012 PARIS

Paris, le 12 février 2013

Dispositions testamentaires de Georges Lochak

A) Dispositions générales concernant la Fondation Louis de Broglie

Je voudrais léguer ici quelques idées, dues à ma longue expérience et à la fréquentation d'éminents personnages, directement ou par mes lectures. J'ai vécu en un temps où tous les fondateurs de la physique du XX° siècle étaient vivants, où on les recevait au séminaire de Broglie de l'Institut Henri Poincaré et où l'on apprenait la dernière idée d'Einstein par les journaux quotidiens avant de la lire dans les journaux scientifiques.

Outre Louis de Broglie dont je suis devenu très proche, j'ai eu la chance d'assister à des séminaires d'Heisenberg, Schrödinger, Pauli, Léon Brillouin, Landau, Bogolioubov, Tamm (qui venait chez moi à la maison) et de bien d'autres personnages scientifiques. J'ai assisté très jeune et très impressionné à une entrevue entre Louis de Broglie et Frédéric Joliot. J'étais un ami de Marie-Antoinette Tonnelat, Costa de Beauregard, David Bohm, Terletsky, j'ai bien connu Tamm, Bogolioubov, Pontecorvo et beaucoup d'autres. J'ai lu les *Œuvres Complètes* d'Einstein, *tous les livres et de nombreux articles* de de Broglie (cela va sans dire). Mais j'ai lu aussi les *Principia* et *l'Optique* de Newton, la *Mécanique analytique* de Lagrange, le *Système du monde* de Laplace, *l'Electromagnétisme* de Maxwell et celui de Planck ainsi que sa *Thermodynamique*, les Œuvres de Schrödinger en *Mécanique Ondulatoire*, les *Leçons sur la propagation des Ondes* d'Hadamard, la *Théorie des Spineurs* et les *Espaces de Riemann* de Cartan, les *Fondements Mathématiques de la Mécanique quantique de von Neumann, la Science et la Théorie de l'Information* de Brillouin, la *Mécanique quantique* de Dirac *et celle d'Heisenberg,* ainsi que de nombreux livres et plus encore de mémoires de Poincaré dont je possède les *Œuvres complètes*, ainsi que celles d'Einstein : celles-ci en russe comme la moitié de ma bibliothèque scientifique.

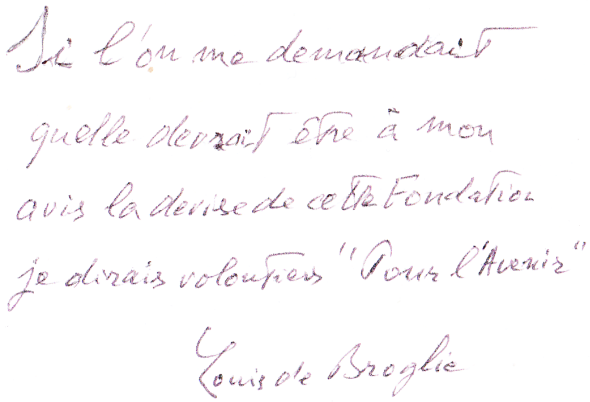
Je ne cite là que des échantillons car j'ai eu une bonne formation. Et ce n'est rien en comparaison de la bibliothèque de de Broglie qui ajoutait en souriant qu'il avait lu plus de livres d'histoire que de physique. Comme Freud, qui disait avoir lu plus de livres d'ethnologie que de psychologie.

C'est pour mes jeunes lecteurs que j'insiste sur la formation classique. Sans elle, on ne fait rien de nouveau car rien n'est jamais périmé dans les acquisitions humaines. Les révolutions scientifiques font preuve d'audace et d'esprit novateur, mais elles sont pétries du passé. On ne peut renouveler que

le passé, pas le néant. La science ne fait jamais « du passé table rase », même s'il lui est arrivé de le prétendre. Quand on lit les fondateurs de la physique du XX° siècle, on est impressionné de leur connaissance de prédécesseurs même lointains. En étudiant la mécanique quantique, on trouve à chaque pas des emprunts à la physique classique, malgré ses allures révolutionnaires : on y trouve les marques de Newton et de Maxwell mais aussi de la Grèce Antique.

Il n'y aurait jamais eu Baudelaire s'il n'y avait eu Chrestien de Troyes et La Pleïade ; ni Rodin si des inconnus n'avaient sculpté les frises du Parthénon.

Voici maintenant des devises auxquelles je tiens. D'abord celle des Broglie : **« Pour l'Avenir »,** que Louis de Broglie offrit à notre Fondation, par une petite carte qu'il m'a remise :


Si l'on me demandait
quelle devrait être à mon
avis la devise de cette Fondation
je dirais volontiers "Pour l'Avenir"
Louis de Broglie

Mais d'autres devises me sont chères :

- Celle des Clermont-Tonnerre **: « Si tous, moi pas ».**
- Celle d'Héraclite **: « Si tu ne guettes pas l'imprévu, jamais tu ne connaîtras la vérité ».**
- Et celle-ci qui m'est propre **: « Si une science sait où elle va, ce n'est plus une science ».**
- Enfin, cette apostrophe fameuse de Niels Bohr **: « C'est une idée complètement folle, reste à savoir si elle est assez folle pour être vraie ! »**

Et voici, non pas une devise, mais une règle de vie à laquelle je tiens :

« Soyez fidèle à votre langue. »

La Fondation a été créée par Louis de Broglie et par moi-même et je me permets, pour une fois, de me mettre en parallèle avec lui en proclamant notre égal attachement à la langue française. C'est un principe de notre fondation auquel il est hors de question de déroger. Certes, il est souvent utile et même inévitable, pour des raisons de communication, de parler ou d'écrire dans une langue étrangère. Actuellement, en général c'est de l'anglais qu'il s'agit ou, plus souvent, d'un pidgin international qu'on fait passer pour la langue de Shakespeare.

Mais on ne conçoit et même on ne comprend vraiment, et surtout on n'exprime une chose importante que dans sa langue maternelle.

Ainsi, Einstein parlait le français mais quand il recevait une lettre de Louis de Broglie, il se la faisait traduire en allemand (c'est lui qui l'a raconté). Inversement, de Broglie connaissait très bien l'allemand mais quand il recevait une lettre d'Einstein, il la traduisait lui-même en français. Je possède quelques lettres d'Einstein traduites de la main de de Broglie. Les physiciens français devraient méditer l'exemple de nos compatriotes mathématiciens, dont la réputation internationale l'emporte sur la nôtre. Or ils écrivent le plus souvent en français et ils sont lus. Certes, il y a un

problème de poule et d'œuf : sont-ils lus en raison de leur réputation ou parce que nos collègues étrangers, contrairement à ce qu'on prétend, lisent le français ? Voici quelques anecdotes à ce sujet :

Quelques temps après la mort de Louis de Broglie, j'ai été invité à Berlin à un congrès interne (donc en allemand) de la fameuse Deutsche Physikalische Geselschaft. Et, le premier jour, j'ai été invité en séance plénière à parler de de Broglie. J'ai commencé en mon mauvais anglais en m'excusant de ne pas connaître l'allemand. Le président de séance m'a aimablement interrompu en me disant : « Mais vous pouvez parler en français, tout le monde comprendra ». Je l'ai fait, en le remerciant, et il avait visiblement raison.

Les deux autres anecdotes concernent de Broglie qui avait pour principe qu'on parle la langue du pays où l'on est. Ainsi, malgré sa lointaine ascendance, il ne connaissait pas l'italien. Un jour, il a voulu visiter l'Italie mais incognito et seulement l'Italie artistique, sans se signaler aux institutions scientifiques qui auraient été ravies de le recevoir. Mais il a pris le temps, avant de s'y rendre, d'apprendre suffisamment d'italien.

L'autre anecdote concerne la visite que lui a faite Gamow, un physicien russe émigré aux Etats Unis. Il a reçu Gamow en français, en le faisant souffrir car celui-ci ne parlait pas notre langue. Quelques temps plus tard, Gamow se trouvait à Londres quand Louis de Broglie y fut invité à faire une conférence. Gamow y est allé, sûr qu'il y aurait un interprète. Surprise : de Broglie parlait un anglais excellent, mais il n'était pas chez lui, il était dans le pays.

La langue n'est pas simplement un moyen de communication, car elle imprime sa marque sur toute la pensée. La primauté de la langue, non pas anglaise mais américaine, après la seconde guerre mondiale a entraîné le pragmatisme au détriment des idées fondamentales et, par là-même, le déclin de la science européenne, et finalement celui de la science en général. Non pas que les américains n'aient pas d'éminents scientifiques, bien sûr, mais ce dont il s'agit, c'est d'un état d'esprit, d'une domination de la science appliquée sur la science fondamentale.

Cette domination est un apanage de l'esprit américain, qui y brille spécialement. Mais dans d'autres pays, elle ne résulte pas d'une évolution naturelle, mais d'une « servitude volontaire » comme auraient dit Montaigne et La Boëtie. On le voit à la manie de truffer sa propre langue d'expressions américaines pour « faire chic », ou dans l'obligation faite, dans certaines entreprises, de s'exprimer en anglais, en communiquant d'un service à un autre dans le même pays (à titre d'exercice, paraît-il).

L'histoire bien connue, des deux congressistes discutant en « broken English », avant de s'apercevoir qu'ils sont compatriotes, n'est pas une invention. Et le fait qu'ils finissent par parler aussi en « broken French » ou en « broken autre chose » n'est pas une invention non plus. Mais une amie anglaise m'a dit un jour que la domination d'une langue anglaise écorchée était à son avis encore plus grave pour l'anglais que pour les autres langues.

Il faut souligner le côté obligé de cette évolution du fondamental vers l'application. Elle n'est pas dans l'application elle-même, mais dans sa confusion avec le fondamental et dans le renoncement à celui-ci. Car il ne faut jamais oublier le désir de « servir » de tous les scientifiques, ainsi que leur intérêt général pour les applications et le fait qu'ils exultent dès qu'ils aperçoivent une application possible de leurs travaux. La curiosité scientifique s'exerce en réalité dans toutes les directions.

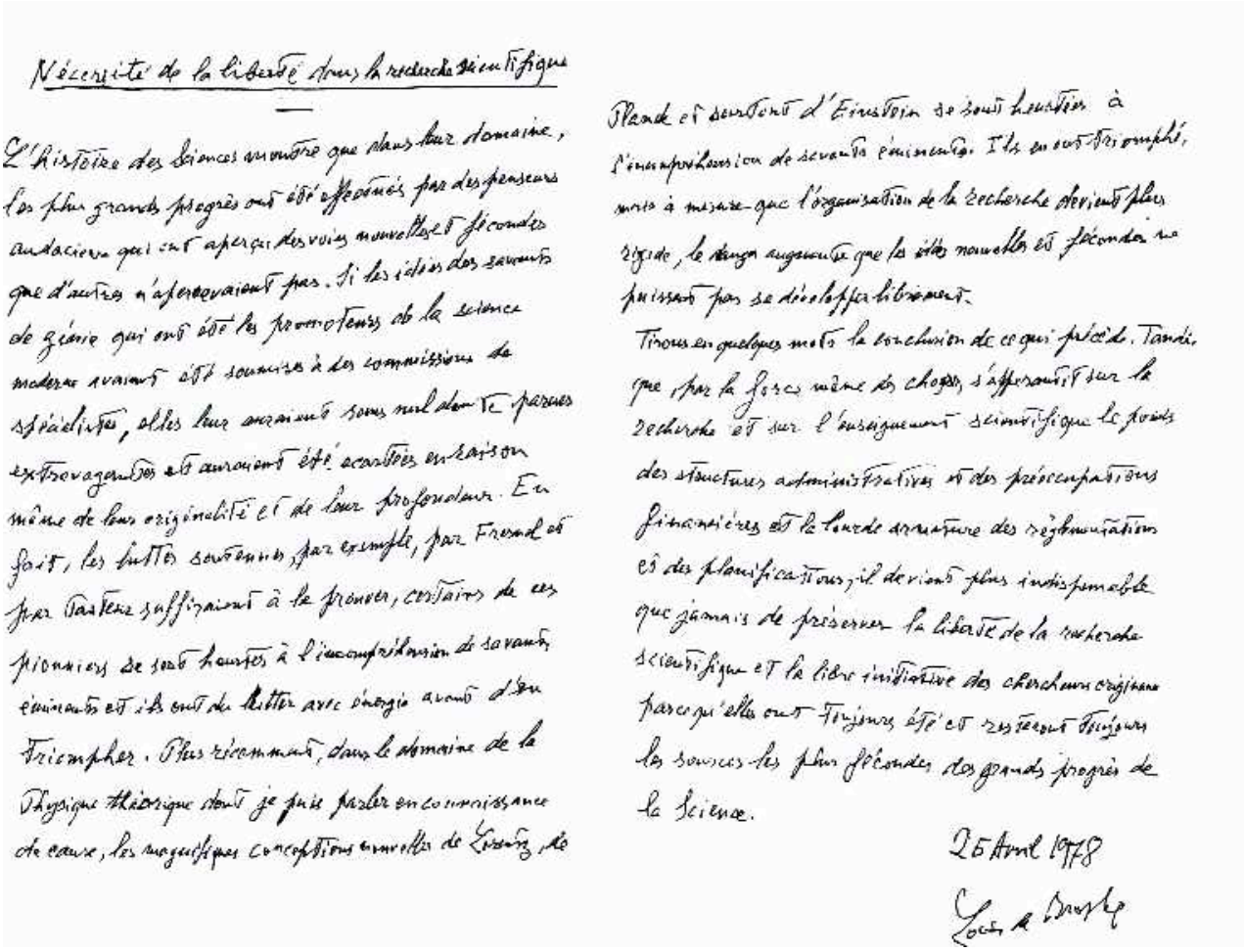
Que l'on songe à Einstein, capable d'inventer le frigidaire sans moteur ou de faire la théorie des méandres des fleuves. Encore qu'il faille reconnaître que le frigidaire, c'était le désir de gommer une sorte d'incohérence logique du compresseur qui développe un travail, forme élevée de l'énergie, pour contourner le second principe en faisant passer la chaleur de la source froide vers la source chaude. Les méandres, c'est autre chose : c'est une apparente violation de la conservation de l'énergie, lorsqu'un fleuve descend le long d'une surface parfaitement plane en décrivant des méandres apparemment inutiles parce qu'ils ne contournent aucun obstacle (on le voit d'une façon frappante

aux sources de la Seine). Einstein a montré que l' « obstacle » n'est pas matériel : c'est la force de Coriolis due à la rotation de la terre sur elle-même !

L'intérêt pour les applications se voyait particulièrement chez Louis de Broglie qui n'était pas le plus fier d'avoir trouvé l'onde de l'électron, mais d'avoir inspiré le microscope électronique. « J'ai peut-être fait autant que Pasteur pour la médecine », m'a-t-il dit fièrement. Il est frappant, aussi, qu'il recevait dans son bureau plus d'ingénieurs que de physiciens et qu'il s'intéressait beaucoup plus au récit qu'on lui faisait de la coordination des chemins de fer qu'à une théorie prétentieuse. De même, il n'évoquait pas les années de la première guerre mondiale, passées au poste de radio de la Tour Eiffel, comme des années de corvée mais comme des années d'apprentissage : « Quand on s'est fatigué et sali les mains à lancer les volants des émetteurs de radio de l'époque, m'a-t-il dit, il est difficile de croire qu'on émettait des ondes de probabilité ».

En conclusion, une chose est de s'intéresser aux applications de la science ou à des problèmes apparemment « petits », qui ont le même droit à la curiosité que les « grands problèmes », mais autre chose est d'identifier des progrès de l'industrie à des progrès de la science.

Mais plus importante encore que la langue est la liberté, chère à Louis de Broglie car il n'y a pas de science sans liberté d'esprit. Voici l'un de ses textes sur ce sujet :



Nécessité de la liberté dans la recherche scientifique

L'histoire des sciences montre que dans leur domaine, les plus grands progrès ont été effectués par des penseurs audacieux qui ont aperçu des voies nouvelles et fécondes que d'autres n'apercevaient pas. 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 leur auraient sans nul doute paru extravagantes et auraient été écartées en raison même de leur originalité et de leur profondeur. En fait, les luttes soutenues, par exemple, par Fresnel et par Pasteur suffisaient à le prouver, certains de ces pionniers se sont heurtés à l'incompréhension de savants éminents et ils ont dû lutter avec énergie avant d'en triompher. Plus récemment, dans le domaine de la Physique théorique dont je puis parler en connaissance de cause, les magnifiques conceptions nouvelles de Lorentz, de Planck et surtout d'Einstein se sont heurtées à l'incompréhension de savants éminents. Ils en sont triomphés, mais à mesure que l'organisation de la recherche devient plus rigide, le danger augmente que les idées nouvelles et fécondes ne puissent pas se développer librement.

Tirons en quelques mots la conclusion de ce qui précède. Tandis que, par la force même des choses, s'appesantit sur la recherche et sur l'enseignement scientifique le poids des structures administratives et des préoccupations financières et la lourde armature des réglementations et des planifications, il devient plus indispensable que jamais de préserver la liberté de la recherche scientifique et la libre initiative des chercheurs créateurs parce qu'elles ont toujours été et resteront toujours les sources les plus fécondes des grands progrès de la Science.

25 Avril 1978

Louis de Broglie

En terminant cette partie, je voudrais avancer quelques idées au sujet de notre Fondation. Elles me sont personnelles et sans prétention de les imposer à mes successeurs.

Ce qu'il faut sauvegarder, à mon avis, c'est avant tout l'esprit dans lequel la Fondation a été créée et sur lequel nous sommes tous d'accord. Notre but premier est la recherche fondamentale. Vivent les applications si nous en trouvons, mais à condition de ne pas devenir un bureau d'étude pour l'industrie. Notre but est de comprendre et de décrire le monde.

Comme nous portons un nom célèbre, celui-ci peut, un jour, devenir celui d'un Grand Prix, mais à condition que ce ne soit pas notre nouvelle vocation et qu'on ne se laisse pas récupérer en devenant des distributeurs de prix sans rapport avec les idées de notre patron, lequel en eût été le premier indigné. N'oubliez pas que, dans des circonstances semblables, il m'a lancé le seul mot d'argot que je lui aie entendu prononcer. Je cite la phrase exacte : « Dites leur que je me fous des honneurs, je n'en ai que trop eu ». Cela s'adressait à l'Académie qui exagérait les honneurs, mais bien sûr, je n'ai rapporté aux destinataires de sa phrase qu'une version édulcorée !

Il faut aussi se garder de recherches sur des problèmes trop généraux, plus philosophiques que physiques comme la notion générale de « paramètres cachés » ou le désir manifesté par certains membres de notre séminaire, de détruire la mécanique quantique pour lui substituer autre chose ! Qu'il y ait des paramètres cachés en physique est une évidence : l'atome, l'onde, le champ, le potentiel, le spin, tout se qui se conçoit abstraitement à un moment donné et qui n'est pas encore mesuré, commence par être un paramètre caché : c'est ainsi que le voyait de Broglie. Toutefois, ces notions ne prennent un sens que si on parvient à les étoffer physiquement et à leur faire jouer un rôle concret, théoriquement descriptible et expérimentalement vérifiable

La religion, comme l'anti-religion des paramètres cachés, les questions vagues telles que : « De tels paramètres existent-il ou non ?», tout cela n'est que fadaises qui ont empoisonné notre séminaire et toute une littérature scientifique. De même, lancer des paradoxes au cours d'une discussion est banal, mais les paradoxes ne sont que des arguments polémiques qui ne frappent que les esprits prévenus en leur faveur et ils ne prouvent rien même s'ils sont signés de noms célèbres.

Guerroyer sous leur étendard n'a pas de sens. Et il y en a encore moins à les retourner (comme le « chat » de Schrödinger) contre les idées de l'auteur, c'est malséant et ridicule. Le « chat » de Schrödinger n'était qu'un trait d'esprit ; le transformer en « téléportation » est une ruine de l'esprit : c'est chercher des succès d'édition comme les promesses électorales qui font gagner une élection.

Cela étant, je me garderai d'indiquer des lignes de recherche, même celles de Louis de Broglie, ou celles qui m'ont réussi personnellement car si l'on peut s'inspirer de ce qu'ont fait les autres, la seule bonne voie pour chacun de nous est celle qu'on trouve soi-même. De Broglie ne donnait pas de sujet de thèse à ses élèves : chacun devait trouver le sien.

Quand l'idée a fleuri autour de nous d'abandonner la mécanique quantique, je me suis élevé contre, au nom de de Broglie lui-même, qui en était l'un des créateurs. On peut chercher à l'expliquer autrement ou à la rendre plus intuitive ; et l'on peut – c'est même un devoir – essayer de la généraliser et de la dépasser, mais sa place dans l'histoire des sciences est assurée. La mécanique quantique est un miracle scientifique : elle a mis quelques dizaines d'années (un clin d'œil dans l'histoire) à conquérir le monde et changer notre vie.

A peine est elle née qu'elle balayait les doutes, grâce la beauté de son image du monde, la puissance de ses prédictions et la profondeur des questions qu'elle soulevait Et cela quelques critiques qu'on puisse lui faire, car il faut reconnaître que cette théorie étrange, peut-être grandie trop vite, nous aveugle un peu par sa fécondité et nous fait oublier ses mystères. Elle a fourni des principes, des formules, des équations d'une efficacité étonnante, dont nous avons appris à nous servir, mais que nous ne comprenons pas toujours. Elle fait marcher nos usines, la radio, la télévision, l'Internet, elle fait voler nos avions et dicte l'heure à nos montres, au nom d'un monde microscopique sous-jacent à celui que nous voyons, qui nous fascine mais qui garde ses secrets.

Les fondateurs de la théorie le savaient et c'est pour cela qu'ils se disputaient. Même un partisan aussi dur que Bohr a pu dire : « Celui qui croit avoir compris la mécanique quantique prouve par là-même qu'il n'a pas comprise». Voici quelques uns des postulats qui sont à la base de la théorie :

1) **La loi de Planck.** Einstein a écrit peu avant sa mort : « Si quelqu'un vous dit qu'il sait ce que $E = h\nu$ veut dire, dites lui que c'est un menteur. » Il pourrait le redire aujourd'hui.

2) **Le photon d'Einstein.** Une fausse particule sans masse, tombée du ciel avec une fréquence, mais sans que rien ne vibre, sinon dans l'onde associée qui a été découverte après et qui n'a pas la même fréquence. On apprendra avec de Broglie que c'est une fréquence d'horloge et non pas d'une onde (celle de de Broglie) avec laquelle elle doit quand-même s'accorder. On pourrait être plus intuitif !

3) **Les trajectoires dans l'atome de Bohr.** Pour une fois c'est intuitif car elles viennent de la théorie classique, mais on les quantifie. Plus tard, dans la mécanique quantique ondulatoire de de Broglie-Schrödinger, ces trajectoires disparaissent complètement sans que rien ne les remplace. Mais où sont les particules ? On l'ignore et pourtant on retrouve - et en mieux - les énergies que Bohr avait trouvées, grâce à ses trajectoires qu'on trouve maintenant primitives, sans savoir faire mieux.

4) **L'onde de de Broglie** : associée à la particule, elle guide son mouvement. L'expérience le confirme, au moins dans certains cas (la diffraction et les interférences) mais pas dans l'atome. L'onde transporte-t-elle de l'énergie ? Rien ne le prouve et on est tenté de dire que l'énergie est dans la particule, comme dans le photon d'Einstein pour la lumière. Mais alors il ne reste plus, pour l'onde, qu'une probabilité. L'ennui c'est que cette probabilité guide le mouvement de la matière et de l'énergie. On comprend qu'il y ait des disputes !

5) **Le principe de Pauli et la théorie de l'atome** (il y a une centaine d'atomes dans le tableau de Mendéleïev). Cette théorie doit généraliser l'atome de Bohr, le plus simple : l'hydrogène. La théorie générale a débuté avec Bohr et Sommerfeld, encore avant la mécanique quantique actuelle. Or la première théorie, comme la nouvelle, exige **le principe de Pauli** qui affirme qu'il n'y a pas, dans l'atome, deux électrons ayant les mêmes nombres quantiques. Un beau théorème expérimentalement vrai. Mais hélas, il ne se déduit pas de la théorie. C'est un principe de plus et on ne sait pas pourquoi.

6) **Le spin.** Dans l'atome de Bohr, non seulement les électrons tournent autour du noyau comme les planètes au tour du Soleil, mais Uhlenbeck et Goudsmit ont découvert que l'électron doit tourner sur lui-même comme font les planètes. C'est le **spin** et c'est merveilleux. Louis de Broglie avait même trouvé avant eux que le photon d'Einstein devait tourner sur lui-même (autrement que l'électron). Mais rien dans l'électron ou le photon ne permet de savoir **qu'est-ce qui tourne !** Le spin, à vrai dire, c'est une lettre de l'alphabet (**s** en Latin ou sigma : σ en Grec) qui, si j'ose le dire, obéit à des loi de symétrie qui sont celles d'une rotation. En outre comme, dans l'électron, c'est l'électricité qui tourne et on obtient du magnétisme : l'électron est donc un petit aimant. L'expérience le confirme mais en fait, rien ne tourne vraiment, ce ne sont que des opérateurs. Ce n'est pas grave puisque déjà l'électron ne tourne pas non plus autour du noyau : il tournait chez Bohr mais pas en mécanique quantique !

7) **Les transitions quantiques.** De Broglie aimait à citer un mots de Schrödinger : *« La théorie des quanta est prolixe tant qu'il ne s'agit que d'états stationnaires où il ne se passe rien, mais elle reste muette au sujet des états de transition qui sont ceux où il se passe quelque chose ».*

L'absence des transitions quantiques dans la théorie est structurelle car cette dernière est hamiltonienne et donc réversible dans le temps. Représenter ces transitions suppose une nouvelle révolution scientifique du même ordre que les quanta. Il faudrait que la stationnarité, qui est à la base de la théorie, soit remplacée par l'évolution et la stabilité asymptotique du mouvement. Ces notions se trouvent dans des formes évoluées de la mécanique classique, chez Poincaré, Birkhoff, Liapounov, Pontriaguine et d'autres mais les résultats connus sont encore loin d'être suffisants.

Cet aperçu des « mystères de la théorie des quanta » montre les trous qui lui restent, ce qui n'est pas étonnant car c'est un enfant prodige, un « surdoué » immature. Vive les générations futures ! Si elles ont du génie et du courage et ne se laissent pas aller à un bavardage pseudo-scientifique, elles réussiront. La grande leçon d'avenir que nous laisse la théorie des quanta, ce ne sont pas tant les belles équations qui « marchent », que le mystère des principes d'où elles sont sorties. Car la science ne commence pas avec le savoir mais avec l'ignorance et avec l'étonnement devant l'inconnu.

Newton a dit sur ses vieux jours, que l'image qu'il se faisait de lui-même était celle d'un petit garçon qui joue avec des galets sur la grève pendant que l'océan de l'inconnu s'étend devant lui.

Pasteur a écrit que « le savant est un homme qui sait s'étonner ». Platon l'avait déjà dit. L'un des plus beaux textes de Louis de Broglie s'intitule : « Mon anxiété devant le problème des quanta ».

Je voudrais maintenant ajouter deux autres points différents des sept points précédents mais qui s'y rattachent et qui transportent leur propre dose de vérité et de mystère.
8) Les relations d'incertitude d'Heisenberg. Je les avais d'abord omises car ce n'est pas un postulat mais un théorème et l'un des plus célèbres de la mécanique quantique. C'est l'une de ses plus étonnantes conséquences, qui a d'ailleurs allumé une controverse. Il faut toutefois remarquer que d'une certaine manière c'est bien un postulat car Heisenberg lorsqu'il était encore au lycée et que la mécanique quantique n'existait pas a dit à l'un de ses camarades : « je crois qu'on ne saurait jamais à la fois où se trouve un électron et où il va ». D'où il avait tiré cette intuition, je l'ignore : c'est ce qui s'appelle le génie scientifique. Ce n'est que de longues années plus tard qu'il a montré que son idée se déduisait de la mécanique quantique à la naissance de laquelle il avait lui-même largement contribué.
9) L'équation de Dirac. C'est l'équation la plus célèbre de la mécanique quantique qui décrit l'électron avec une précision telle qu'il fallut à l'expérience plus de vingt ans avant d'y apporter une retouche (l'effet lamb). Cette équation peut être rangée parmi les plus extraordinaires postulats de la mécanique quantique mais elle contenait un mystère encore plus grand que les autres qui était de prévoir des états de l'électron à énergie négative, ce qui parut le comble de l'absurde.
Dirac, avait d'ailleurs remarqué que de tels états existaient dans l'équation de Klein-Gordon et son équation avait pour but de les supprimer. Mais à son grand désappointement, il a découvert qu'ils se trouvaient aussi dans la nouvelle équation, mais il a compris que les états de l'électron à énergie négative, étaient équivalents à des états à charge positive (au lieu d'être négative comme l'électron) mais avec une énergie positive également. C'était la prévision du positron dont l'existence a été expérimentalement prouvée et qui est la plus extraordinaire prévision de l'équation de Dirac Il faut ajouter que malgré la gloire qu'il en a tirée, Dirac ne l'a jamais admis et s'est battu toute sa vie pour trouver une équation à énergie toujours positive qui contiendrait le positron. Comme on sait, il n'y est pas parvenu.

B) Dispositions scientifiques. Ces dispositions scientifiques ne concernent que les travaux et les principes scientifiques de Louis de Broglie, suivis des miens propres qui s'en inspirent.

1) Les travaux et les conceptions scientifiques générales de Louis de Broglie.

L'œuvre de Louis de Broglie s'articule autour de deux grandes idées :
L'Onde de Matière et la Théorie Neutrinienne de la Lumière.

A) La première idée, l'onde de matière, fut avancée par de Broglie d'abord pour l'électron, puis généralisée à toutes les particules matérielles sous la forme du **dualisme des ondes et des corpuscules**. Elle donna naissance, grâce à Schrödinger, à la mécanique ondulatoire qui devint l'un des soubassements de la théorie des Quanta. Mais Louis de Broglie y voyait deux paradoxes :

Le premier paradoxe est que jadis l'optique était ondulatoire et la mécanique corpusculaire. Avec le photon d'Einstein, l'optique est devenue dualistique, du moins en principe. Mais pas la mécanique car les corpuscules sont absents de toutes les équations : de Schrödinger, Klein - Gordon et Dirac. La mécanique est devenue purement ondulatoire, comme l'était jadis l'optique.

De Broglie tenta un rattrapage en montrant qu'aux solutions continues des équations d'onde, on peut associer des solutions de même phase, dont l'amplitude comporte une **singularité** qui localise la particule et dont le mouvement est imposé par l'onde continue grâce à un **théorème du guidage.** C'est un beau résultat qu'un collaborateur et ami de de Broglie, Francis Fer, a renforcé en montrant que, **dans un phénomène d'interférence, la singularité de l'onde se dirige vers les franges claires**, conformément à l'observation. Mais malgré cela, cette théorie dite de **« la double solution »**, est décevante car elle ne pénètre pas à l'intérieur des atomes et ne généralise pas la théorie de de Bohr. Pour ma part, je n'y ai pas travaillé.

Le second paradoxe de la théorie était la lumière. L'onde de de Broglie est partie de l'idée de réunir le photon d'Einstein et l'onde de Maxwell. Or la théorie a dévié vers la mécanique ondulatoire d'où non seulement les corpuscules étaient absents mais même **la lumière d'où de Broglie était parti ! Il mit 10 ans à répondre, mais il en résulta sa seconde grande idée :**

B) Une nouvelle théorie de la lumière. De Broglie eut le génie de considérer le photon non plus comme une particule élémentaire mais comme une particule de spin maximum 1 résultant de la fusion de deux particules de spin ½ . Le résultat fut impressionnant : il retrouva les équations de Maxwell à partir de l'équation de Dirac, avec des termes de masse du photon[1].

Remarque préliminaire. Maxwell a voulu réunir les lois de Coulomb, d'Ampère et de Faraday, mais il fut frappé d'une dissymétrie entre les deux premières lois et celle de Faraday, seule à dépendre du temps (ce dont personne ne voulait !). Il eut le génie de rétablir la symétrie contre l'opinion commune en introduisant le **courant de déplacement** et avec lui le temps qui, à ses yeux, manquait aux lois de Coulomb et d'Ampère. De là vint l'harmonie des équations de Maxwell et leurs glorieuses conséquences : la théorie électromagnétique de la lumière, les ondes de radio et tout l'électromagnétisme. Or, s'il est vrai que Louis de Broglie a retrouvé les équations de Maxwell, il n'est plus question chez lui de courant de déplacement ! Car celui-ci apparaît tout naturellement sans qu'on ait à l'introduire : il n'est qu'une simple conséquence de la symétrie relativiste ! « War es Ein

[1] Certains créditent Proca à propos de la masse du photon, mais c'est une sottise car il n'y était pour rien.

Gott der diese Zeilen schrieb» s'était exclamé Boltzmann (citant un vers du *Faust* de Gœthe) devant les équations de Maxwell ; mais la physique avait un nouveau dieu, Einstein, qui par la main de de Broglie, rendit à Maxwell ce que la relativité lui devait. Car il faut se rappeler que la transformation de Lorentz elle aussi est une lointaine descendante du courant de déplacement et qu'elle donne, en retour, naissance à une nouvelle symétrie, celle de la relativité, qui retrouve le courant en question. De Broglie, dans sa théorie de la lumière, referma la boucle miraculeuse de Maxwell et d'Einstein.

Après cela, de Broglie généralisa son idée avec la **Théorie Générale des Particules à spin** qui aboutit notamment à réunir, en collaboration avec Marie-Antoinette Tonnelat, le graviton et le photon dans une **théorie unitaire** : cette théorie retrouve, selon le vœu d'Einstein, les équations de la relativité générale (à l'approximation linéaire) et les équations de Maxwell avec masse[2]. Il faut noter ici un point important, découvert par Louis de Broglie et sur lequel nous reviendrons : **par un apparent paradoxe, la séparation entre les équations de la gravitation et de l'électromagnétisme n'est pas covariante relativiste, pas plus d'ailleurs que la séparation entre les équations de spin 1 et 0, dans la théorie de la lumière comme dans celle du graviton**. **Et ce n'est pas bénin !**

Citons encore, rapidement, les dernières idées de de Broglie :

Tout d'abord la nécessité **d'équations quantiques non linéaires.** On l'a vu dans la théorie unitaire de de Broglie-Tonnelat qui est approximative, car elle est linéaire, comme toute la mécanique quantique, alors que la relativité veut des équations non linéaires. Il en était déjà ainsi dans la théorie de la double solution où la particule ne peut être représentée que par une singularité ponctuelle infinie, à cause de la linéarité, alors qu'il faudrait une **onde à bosse continue et donc non linéaire** qui introduirait une structure de la particule. Hélas, aucune loi physique n'indique dans quel sens on pourrait chercher ce genre d'équation. Deux autres grands physiciens ont osé violer le tabou des équations linéaires : Werner Heisenberg et MaxBorn, mais comme de Broglie, sans succès véritable. Nous verrons que le magnétisme offre peut-être de nouvelles pistes.

La dernière grande idée de de Broglie, restée inachevée, est **la thermodynamique de la particule isolée**. On sait que la mécanique ondulatoire est née de l'idée de rassembler en une seule théorie la mécanique et l'optique, sous la forme des **principes de moindre action et de Fermat**. La dernière idée de de Broglie fut d'y joindre une troisième loi extrémale : le **second principe de la thermodynamique.** Il avait pour cela un but précis. En effet les deux principes précédents n'étaient que des principes optimaux stationnaires et réversibles. Ils ne pouvaient représenter que les états quantiques, eux aussi stationnaires, mais pas les transitions d'un état quantique à un autre. Au contraire, le second principe n'est stationnaire que dans les états d'équilibre thermodynamique auxquels on peut assimiler les états quantiques, mais en dehors de ces états, c'est un principe évolutif qui devrait être capable de décrire les transitions quantiques. Cette idée d'un principe évolutif est venue, sous différentes formes, à d'autres auteurs. On la trouve notamment chez le mathématicien américain George David Birkhoff qui se fondait sur une généralisation des lois de la mécanique classique : **la théorie des mouvements centraux**.

L'idée thermodynamique de de Broglie avait des grands antécédents chez Helmholtz et Boltzmann. Ce dernier avait fait une sorte de thermodynamique des systèmes mécaniques périodiques. Mais pour introduire cela en mécanique quantique, il fallait rendre relativistes les théorie précédentes, ce que fit de Broglie. Je me suis joint à lui avec la théorie des **systèmes adiabatiques,** c'est à dire le cas limite des systèmes quantiques dépendant de **paramètres variant infiniment lentement**. De tels systèmes étaient déjà connus, mais je les ai généralisés à des systèmes qui, d'une part, dépendent périodiquement du temps et, d'autre part, dépendent de paramètres à variation très

[2] Nous verrons plus loin qu'en vertu de mes travaux venus longtemps après, les choses sont un peu plus compliquées que mes éminents prédécesseurs ne le croyaient. Mais gloire à eux !

lente. Ces états ont permis de définir une classe d' **« états permanents »** qui généralisent les états stationnaires. Ils sont capables de définir, comme eux, une base et de généraliser les notions d'énergie et d'entropie avec des **lois de conservation** et une extension du **second principe.**

Tout cela n'est qu'un aperçu de l'œuvre scientifique de Louis de Broglie. On trouvera plus de précisions dans le Tome 17 (1992) des Annales de la Fondation Louis de Broglie qui célébrait son centenaire. On y verra notamment le texte complet de sa célèbre Thèse et la liste de ses publications. On pourra lire également les livres de la Section IV (Ouvrages) de ma Bibliographie Générale, notamment deux ouvrages biographiques que je lui ai consacrés : n°s 5 et 9 ainsi que le n° 1 en collaboration avec J. Andrade e Silva, qui expose ses idées physiques plus largement que je ne pouvais le faire ici.

2) Mes travaux scientifiques.

Je vais d'abord donner la liste de mes publications. On verra que nombre d'entre elles sont influencées par de Broglie, même quand elles s'en écartent, comme celles qui concernent l'émission et l'absorption de la lumière ou divers problèmes de mécanique ayant trait notamment aux accélérateurs de particules ou à la théorie de la stabilité du mouvement. En particulier, on trouvera de nombreuses publications sur les phénomènes adiabatiques (**les états permanents**) qui étaient en quelque sorte « en marge » de la thermodynamique de de Broglie, du fait que mes travaux ne concernaient qu'une limite à entropie constante des phénomènes considérés par de Broglie, mais avec le mérite de les étendre à des états dépendant périodiquement du temps, qui généralisent les états stationnaires aux interactions avec des champs extérieurs. Les deux principes de la thermodynamique sont généralisés à ces états permanents non - stationnaires.

Mais pour ma part j'attache la plus grande importance à mes travaux des dernières trente années sur le **monopôle magnétique leptonique** et sur la généralisation de la théorie de la lumière de de Broglie qui s'en est suivie. C'est pourquoi je leur réserve une place particulière, notamment dans une liste à part qu'on verra plus loin (dans la **Partie VI**, de la liste ci-dessous).

LISTE GÉNÉRALE DE MES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

I NOTES ET MEMOIRES

[1] *Fluides relativistes à spin*, C. R. Acad. Sci., **241**, 1955, p. 692, en collaboration avec F. Halwachs et J.P. Vigier.

[2] *Fluides relativistes à spin*, C. R. Acad. Sci., **241**, 1955, p. 744, en collaboration avec F. Halwachs et J.P. Vigier.

[3] *Paramètres relativistes de Cayley-Klein dans l'équation de Dirac*, C. R. Acad. Sci., **243**, 1956, p. 234, en collaboration avec G. Jakobi.

[4] *Décomposition de l'impulsion de Dirac et invariance de jauge*, C. R. Acad. Sci., **243**, 1956, p. 357, en collaboration avec G. Jakobi.

[5] *A propos des fluides à spin*, C. R. Acad. Sci., **244**, 1957, p. 2291.

[6] *Signification mécanique de l'invariance de jauge*, C. R. Acad. Sci., **245**, 1957, p. 2023.

[7] *Masses fluides en rotation*, C. R. Acad. Sci., **246**, 1958, p. 710, en collaboration avec P. Hillion et J.P. Vigier.

[8] *Classification des particules*, C. R. Acad. Sci., **246**, 1958, p. 896, en collaboration avec P. Hillion et J.P. Vigier.

[9] *Sur la théorie quantique des corps solides en rotation*, C. R. Acad. Sci., **246**, 1958, p. 2855.

[10] *Problèmes sur le groupe des rotations et la toupie quantique*, Cahiers de Physique., **13**, 1959, p. 41 (THESE DE DOCTORAT).

[11] *Les oscillations bêtatroniques propres dans les accélérateurs à forte convergence*, Zhurnal Tekhnicheskoj Physiki (Journal de Physique Technique), **29**, 1959, p. 995 (article publié en russe puis en anglais).
[12] *Sur la théorie non linéaire des ondes*, C. R. Acad. Sci., **250**, 1960, p. 1986.
[13] *Un modèle d'équation non linéaire conservant certaines ondes planes*, C. R. Acad. Sci., **250**, 1960, p. 2146.
[14] *Quantification*, *stationnarité et non linéarité* C. R. Acad. Sci., **251**, 1960, p. 2305, en collaboration avec J. Andrade e Silva, F. Fer et Ph. Leruste.
[15] *Echanges d'énergie dans les systèmes en voie de quantification*, C. R. Acad. Sci., **251**, 1960, p. 2482, en collaboration avec J. Andrade e Silva, F. Fer et Ph. Leruste.
[16] *Non linéarité, cycles limites et quantification*, C. R. Acad. Sci., **251**, 1960, p. 2662, en collaboration avec J. Andrade e Silva, F. Fer et Ph. Leruste.
[17] *Quantification*, *stationnarité et non linéarité*, Cahiers de Physique, **15**, 1961, p. 210, en collaboration avec J. Andrade e Silva, F. Fer et Ph. Leruste.
[18] *Problèmes de stabilité pour des systèmes à un grand nombre de degrés de liberté*, Cahiers de Physique, **16**, 1962, p. 1, en collaboration avec J. Andrade e Silva, F. Fer et Ph. Leruste.
[19] *La thermodynamique de la particule isolée et la description des transitions quantiques*, C. R. Acad. Sci., **254**, 1962, p. 4260, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[20] *Sur le second principe de la thermodynamique et la stabilité asymptotique au sens de Liapounov*, C. R. Acad. Sci., **254**, 1962, p. 4436.
[21] *Sur l'équation de Mac Millan-Weksler*, C. R. Acad. Sci., **256**, 1963, p. 2131, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[22] *Peut-on réduire l'imprécision en énergie sur une cible intérieure à un accélérateur circulaire ?* C. R. Acad. Sci., **256**, 1963, p. 2308, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[23] *Sur la théorie non linéaire des transitions quantiques*, C. R. Acad. Sci., **256**, 1963, p. 3601.
[24] *Sur quelques propriétés géométriques du groupe des rotations,* Gazeta de Fisica, vol. **IV,** Fasc. 5, 1963, p. 136.
[25] *Sur l'irradiation d'une cible à l'intérieur d'un accélérateur circulaire,* Nuclear Instruments and Methods, **26**, 1964, p. 22, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[26] *Sur le comportement d'un mouvement asymptotiquement stable soumis à des perturbations aléatoires*, C. R. Acad. Sci., **258**, 1964, p. 3172.
[27] *Sur les perturbations rapidement oscillantes d'un système dynamique à stabilité asymptotique*, C. R. Acad. Sci., **258**, 1964, p. 3172.
[28] *Les résonances de phase non linéaires dans un synchrotron de grande énergie,* J. de Physique., **25**, 1964, p. 981, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[29] *Sur un déplacement des niveaux d'énergie dans un système atomique fortement éclairé*, C. R. Acad. Sci., **259**, 1964, p. 3183.
[30] *L'hypothèse des quanta et la théorie générale de la stabilité du mouvement*, Colloque Beth, « Calcul, Prévisions et Réalités », Gauthier-Villars, Paris, 1964.
[31] *Sur l'optique non linéaire*, C. R. Acad. Sci., **260**, 1965, p. 72.
[32] *Un procédé d'irradiation sélective en faisceau interne,* J. de Physique (série A), 1965, p. 97, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[33] *Sur l'évolution vers une distribution limite d'un nuage de particules en cours d'accélération,* Portugalia Physica I, 1964, p. 7, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[34] *Sur les accélérateurs à ions négatifs,* Nuclear Instruments and Methods, **36**, 1965, p. 112, en collaboration avec J. Andrade e Silva.
[35] *Les méthodes de la mécanique non linéaire et la théorie quantique des interactions entre la matière et les rayonnements intenses,* J. de Physique., **26**, 1965, p. 235.
[36] *Sur la méthode des moyennes et les problèmes de résonance en mécanique ondulatoire,* C. R. Acad. Sci., **264** B, 1967, p. 407, en collaboration avec M. Thiounn.

[37] *Sur le problème des résonances en mécanique ondulatoire et la dispersion de la lumière,* C. R. Acad. Sci., **264** B, 1967, p. 1533, en collaboration avec M. Thiounn.
[38] *Calcul des fonctions d'onde d'un atome éclairé par une lumière cohérente dont la fréquence balaye un large intervalle comprenant une fréquence spectrale,* C. R. Acad. Sci., **265** B, 1967, p. 1, en collaboration avec M. Thiounn.
[39] *Sur le déplacement et l'enchevêtrement des raies d'émission et de diffusion Raman dans les phénomènes de résonance,* C. R. Acad. Sci., **265** B, 1967, p. 333, en collaboration avec M. Thiounn.
[40] *Sur le théorème H de Boltzmann et le mouvement brownien,* C. R. Acad. Sci., **266** B, 1968, p. 25, en collaboration avec P. Hammad.
[41] *L'émission stimulée de la lumière comme battement entre une onde d'émission et une onde de diffusion combinée du second ordre,* C. R. Acad. Sci., **266** B, 1968, p. 825, en collaboration avec M. Thiounn.
[42] *Sur une émission hertzienne dans des phénomènes de résonance optique,* C. R. Acad. Sci., **266** B, 1968, p. 1405, en collaboration avec J. Emond et M. Thiounn.
[43] *Une méthode générale de perturbation en mécanique ondulatoire et son application aux problèmes de résonance*, J. de Phys., **30**, 1969, p. 482, en collaboration avec M. Thiounn.
[44] *Y a-t-il des circonstances où les fréquences d'émission échappent à la loi de Bohr,* C. R. Acad. Sci., **268** B, 1969, p. 897, en collaboration avec M. Thiounn.
[45] *Sur l'identité de nature de l'effet Autler-Townes et de l'effet Raman résonnant,* C. R. Acad. Sci., **268** B, 1969, p. 1452, en collaboration avec M. Thiounn.
[46] *Théorie de l'irradiation d'une molécule par une lumière cohérente intense pouvant entrer en résonance avec une bande de fréquences*, J. de Phys., **31**, 1970, p. 871.
[47] *Polarisation électrique induite par une onde lumineuse sur un système quantique possédant deux bandes d'énergie* J. de Phys., **32**, 1971, p. 11, en collaboration avec A. Beswick.
[48] *Un théorème adiabatique pour les systèmes non conservatifs, et ses conséquences sur les interactions entre la matière et le rayonnement,* C. R. Acad. Sci., **272** B, 1971, p. 1281.
[49] *Transitions induites entre états permanents d'une molécule dans un champ de radiofréquence,* C. R. Acad. Sci., **274** B, 1972, p. 935, en collaboration avec D. Guichon, Mme G. Théobald et J. G. Théobald.
[50] *Une nouvelle démonstration du théorème adiabatique pour les systèmes conservatifs en mécanique ondulatoire,* C. R. Acad. Sci., **274** B, 1972, p. 1391.
[51] *Sur les invariants adiabatiques d'un système quantifié perturbé par une onde cohérente,* C. R. Acad. Sci., **275** B, 1972, p. 49.
[52] *Sur un effet de transparence obtenu à une fréquence d'absorption atteinte grâce à un déplacement adiabatique,* C. R. Acad. Sci., **275** B, 1972, p. 903.
[53] *La thermodynamique cachée des particules,* Contribution à l'ouvrage collectif : « Louis de Broglie, sa conception du monde physique », Gauthier-Villars, Paris, 1973 [1].
[54] *Transitions induites entre états permanents,* C. R. Acad. Sci., **276** B, 1973, p. 103.
[55] *Sur les mélanges de cas purs et la thermodynamique de von Neumann,* C. R. Acad. Sci., **276** B, 1973, p. 809.
[56] *Sur le caractère intrinsèque de la définition des invariants adiabatiques d'un système perturbé par une onde cohérente,* C. R. Acad. Sci., **279** B, 1974, p. 547.
[57] *Sur le concept de température de spin dans le référentiel tournant et la théorie des états permanents,* C. R. Acad. Sci., **280** B, 1975, p. 589, en collaboration avec A. Alaoui.
[58] *Paramètres cachés et probabilités cachées,* Contribution au colloque : « Un demi-siècle de mécanique quantique», Fundamenta Scientia N° 38, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1975.
[59] *Present, predicted and hidden probabilities,* Foundations of Physics,**5**, N°1, 1976, en collaboration avec Louis de Broglie, A. Beswick, et J. Vassalo Pereira.
[60] *Sur l'invariance adiabatique au sens d'Ehrenfest et la définition de l'entropie en Mécanique statistique,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **1**, N°2, 1976.

[61] *Has Bell's inequality a general meaning for hidden variable theories ?,* Foundations of Physics,**5**, N°2, 1976.
[62] *Le théorème adiabatique pour une certaine classe de systèmes non conservatifs en dynamique,* C. R. Acad. Sci., **282** A, 1976, p. 657, en collaboration avec J. Vassalo Pereira.
[63] *Déduction classique des états permanents de la mécanique quantique,* C. R. Acad. Sci., **282** B, 1976, p. 321, en collaboration avec J. Vassalo Pereira.
[64] *Les invariants adiabatiques en dynamique classique des petites vibrations,* C. R. Acad. Sci., **282** B, 1976, p. 1121, en collaboration avec J. Vassalo Pereira.
[65] *La théorie des états permanents*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **2**, 1977, p.87, en collaboration avec A. Alaoui.
[66] *Sur les paradoxes de la physique et sur ceux de la discussion scientifique (le paradoxe EPR)*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **3**, 1978, p.71.
[67] *Quantization as a stability problem*, International Seminar on « Mathematical theory of dynamical systems and microphysics » (1979), Udine (Italie), Ed. CISM-Springer Verlag, Wien, New-York, 1980.
[68] *Sur une extension du théorème de Floquet à des systèmes hamiltoniens non linéaires, périodiques par rapport au temps,* C. R. Acad. Sci., **289** B, 1979, p. 95.
[69] *A non linear generalization of the Floquet theorem and an adiabatical theorem for hamiltonian systems periodic in time,* Hadronic Journal., **4** B, 1981, p. 1105.
[70] *Adiabatical invariants in linear dynamical systems periodically depending on time, with an application to the statistical fluctuations of Mathieu oscillator,* 2nd International Seminar on Mathematical Theory of Dynamical systems and Microphysics, Udine (Italy), 1981. Academic Press, 1982, en collaboration avec J. Vasssalo Pereira.
[71] *Adiabatical invariants in nonlinear dynamical systems periodically depending on time, with an application to the parametrical resonance of (nonlinear) pendulum,* same Seminar, Academic Press, 1982.
[72] *Irreversibility in physics, reflections on the evolution of ideas in mechanics and on the actual crisis in physics,* Foundations of Physics, **11**, N°7/8, 1981, p. 593.
[73] *L'invariance adiabatique comme l'un des principes fondamentaux de la physique statistique* (en russe), Contribution au livre jubilaire de J.P. Terletsky, Moscou, 1982.
[74] *Une méthode de moyennisation valable dans une large zone de résonance pour des systèmes hamiltoniens classiques non autonomes,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **8**, 1983, p. 155, en collaboration avec M. Karatchentzeff.
[75] *Sur un monopôle de masse nulle décrit par l'équation de Dirac, et sur une équation générale non linéaire qui contient des monopôles de spin 1/2* (1ière partie)., Annales de la Fondation Louis de Broglie, **8**, 1983, p. 345
[76] *Même titre*, (2ième partie), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **9**, 1984, p. 5.
[77] *Wave equation for a magnetic monopole*, IJTP, **24**, 1985, p. 1019.
[78] *The question of microirreversibility in statistical mechanics and in quantum physics*, in « Dynamical systems a Renewal of Mechanics », (voir IV [5]), 1986.
[79] *The symmetry between electricity and magnetism and the wave equation of a spin 1/2 magnetic monopole*, in : Information, complexity and control in quantum physics (voir : IV, [6]), 1987.
[80] *Etats électriques et états magnétiques dans le champ de Majorana*, (Première partie : états électriques), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **12**, 1987, p. 135.
[81] *Über einige physikalische Deutungen der Planckschen Konstante,* in : Vorträge Physikertagung 1987 Berlin (Didaktig der Physik, Wilfried Kuhn Herausgeber), Deutsche Physikalische Gesellschaft, Berlin, 1987.
[82] *Total angular momentum and atomic magnetic moments,* J. of Magnetic Materials, **65**, 1987, p. 99, en collaboration avec X. Oudet.
[83] *Sur quelques interprétations physiques de la constante de Planck*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **13**, 1988, p.219 (traduction française de la référence [81]).

[84] *La géométrisation de la physique,* contribution au Colloque René Thom : *Logos et Théorie des Catastrophes,* tenu à Cerisy en 1982, actes réunis par J. Petitot, publiés par les Editions Patiño, Genève 1988.
[85] *L'irréversibilité en physique*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **13**, 1988, p. 409 (Version complétée du texte de [72].
[86] *Sur le rôle de la relativité en mécanique ondulatoire,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **15**, 1990, p. 109, (collaboration avec R. Dutheil.
[87] *Nonlinear Spinorial Wave Equation for a Magnetic Monopole,* in : *Nonlinear World*, IV International Workshop on Nonlinear and Turbulent Processes in Physics, Kiev 1989, World Scientific, Singapore, 1990.
[88] *Sur un modèle d'équation spinorielle non linéaire*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **16**, 1991, p. 43, en collaboration avec C. Daviau.
[89] *Un monopôle magnétique dans le champ de Dirac*, (*Etats magnétiques du champ de Majorana*), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **17**, 1992, p. 203.
[90] *Sur la signification de la constante de Planck* (version révisée de (I, [83]), contribution à: (IV, [9]), 1993.
[91] *Déplacement d'une fréquence de résonance moléculaire au premier ordre de la théorie des perturbations* (en collaboration avec G. Lomaglio et J.G. Théobald), contribution à : (IV, [9], 1993.
[92] *Sur les solutions localisées d'une équation non linéaire représentant un monopôle magnétique*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **18**, 1993, p. 1, en collaboration avec E. Maslov.
[93] *About a recent paper of P.Y. Chu, an old formula of Planck and Laue, and de Broglie's hidden thermodynamics*), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **18**, 1993, p. 345.
[94] *Y a-t-il un rapport entre la synchronisation des réseaux électriques, le potentiel d'action d'une membrane cellulaire et la mécanique quantique ?* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **19**, 1994, p.63.
[95] *Sur la présence d'un second photon dans la théorie de la lumière de Louis de Broglie*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **20**, 1995, p. 111.
[96] *The Symmetry between Electricity and Magnetism and the Problem of the Existence of a Magnetic Monopole,* contribution au recueil : *Advanced Electromagnetism,* Ed. T.W. Barrett, D.M. Grimes, World Scientific, Singapore, 1995, *p. 105-148.*
[97] *Sur les cavités résonnantes prises comme étalon de temps,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **21**, 1996, p. 181.
[98] *Les symétries P,T,C, les solutions à énergie négatives et la représentation des antiparticules dans les équations spinorielles, partie I,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **22**, 1997, p. 1.
[99] *Les symétries P,T,C, les solutions à énergie négatives et la représentation des antiparticules dans les équations spinorielles, partie II,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **22**, 1997, p. 187.
[100] *The action of an Electrostatic Potential on the Electron Mass,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, en collaboration avec O. Costa de Beauregard, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **24**, 1999, p. 159.
[101] *Sur un déplacement des franges d'interférences électroniques dans un potentiel magnétique sans champ,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **25**, 2000, p. 107 (Traduit en russe dans Prikladnaja fizika, 2-2003, p. 5).
[102] *Le potentiel vecteur mesuré dans une expérience de Tonomura*, en collaboration avec O. Costa de Beauregard, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **25**, 2000, p. 303.
[103] *Open letter to Akira Tonomura : prediction of a crucial effect*, en collaboration avec O. Costa de Beauregard, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **26**, 2001, p. 601.
[104] *A new theory of the Aharonov-Bohm effect, (English version of* [101]), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **27**, 2002, p. 529.

[105] *Un lepton magnétique capable d'intervenir dans les interactions faibles,* Annales de la Fondation Louis de Broglie **27**, 2002, p. 727, complément à l'article d'Urutskoiev et al., A.F.L.B. **27**, 2002, p. 701. Traduit en russe : Prikladnaja fizika, **3**-2003, p.10
[106] *L'équation de Dirac sur le cône de lumière : Electrons de Majorana et monopôles magnétiques*, Annales de la Fondation Louis de Broglie **28**, 2003, p. 403.
[107] *« Photons électriques » et « photons magnétiques » dans la théorie du photon de de Broglie (un renouvellement possible de la théorie du champ unitaire d'Einstein),* Annales de la Fondation Louis de Broglie **29**, 2004, p. 297.
[108] *Quelques questions à propos de la formule de Dirac pour la charge d'un monopôle magnétique,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **27**, 2004, p. 695 (Traduit en russe dans Prikladnaja fizika, **6**-2004 p. 5.
[109] *Low-Energy Nuclear Reactions and Leptonic Monopoles,* en collaboration avec Leonid Urutskoev, Conférence Internationale sur la Fusion Froide (ICCF 11), Marseille 31.10.04 au 05.11.04, 2004.
[110] *Theory of Light Monopoles and their Physical, Chemical, Biologicalo and Nuclear Effects,* Conférence Internationale sur la Fusion Froide (ICCF 11), Marseille 31.10.04 au 05.11.04. Traduit en russe dans Prikladnaja fizika, 2006 p. 5.
[111] *Addendum à un mémoire de Gouanère et al.* (A.F.L.B. **30**, 2005, p.109 sur la *fréquence propre de de Broglie*), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **30**, 2005, p. 115.
[112] *Remarques sur une note de Costa de Beauregard qui fut sa dernière publication scientifique* : *Prédiction d'un nouvel effet A.B.C. ,* Ann. Fond. Louis de Broglie, 31, 2006, p. 1.
[113] *The Equation of a Light Leptonic Magnetic Monopole and its Experimental Aspects*, Z. Naturforsch. **62a**, 2007, p.231.
[114] *Twisted space, chiral gauge and magnetism*, Ann. Fond. Louis de Broglie**, 33**, **32,** 2007, p. 125 (traduction russe dans « Prikladnaja Fizika »).

[115] *Sur laprésence de monopôles magnétiques légers au pôle Nord* G. Bardout, G. Lochak, D. Fargue, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **32**, 2007, p. 551.
[116] *A Leptonic Magnetic Monopole : Theory and Experiment,* Colloque de Peyresq 2007, *Ann. Fond. Louis de Broglie*, **33**, 2008, p.1.
[117] *Groupe des rotations et représentations*, Ann. Fond. Louis de Broglie**, 33**, 2008, (traduction russe dans « Prikladnaja Fizika »)

[118] « *Photon Electriques » et « Photons magnétiques ». Un renouvellement possible de la théorie du champ unitaire d'Einstein.* Annales de la Fondation Louis de Broglie **33**, 2008, p.107 (réédition complétée de l'article : [107].
[119] *A theory of light with 4 different photons : Electric and magnetic, with spin 1 and 0* (Part I : Optics), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **35**, 2010, p.1 .
[120] *A new electromagnetism with 4 different photons* (Part II : Gravitation). Annales de la Fondation Louis de Broglie, **36**, 2011, p. 1 (tr.in Russian, in Prikladnaja Fisika).

II EXPOSES, MISES AU POINT, PREFACES.

[1] *Quelques réflexions sur le théorème de Bell*, Lettres épistémologiques (Institut de la méthode) 10ième livraison, 1976, p. 1.
[2] *Vers une microphysique de l'irréversible,* Revue du Palais de la Découverte, **5**, N°48, 1977, p. 15.
[3] *Hiddden parameters, hidden probabilities,* Contribution à l'ouvrage collectif : « Quantum mechanics a half century later », Reidel, Dordrecht, 1977.
[4] Contribution au colloque : *Indéterminisme quantique et variables cachées*, Lettres épistémologiques (Institut de la méthode) 19ième livraison, 1978, p. 31.
[5] *Les arrière-petits-enfants de Maxwell*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **4**, 1979, p. 1.
[6] *L'irréversibilité en physique, Bulletin IEN-ENSM N°31*, 1979, p. 2.

[7] *Le paradoxe EPR et l'usage des espaces abstraits en physique*, Colloque « Einstein », Collège de France (1979), Editions du CNRS, 1980, p. 1587.
[8] *Einstein et la lumière,* Revue du Palais de la Découverte, **8**, N°79, 1980, p. 30.
[9] *La science et l'humanisme* et : *Que savons nous du dualisme onde-corpuscule à la fin du XX° siècle ?* : contributions à *La pensée physique en 1980* , (voir : IV [3]), 1982.
[10] *The evolution of the ideas of Louis de Broglie on the interpretation of wave mechanics,* Foundations of Physics, **12**, 1982, p. 931.
[11] *Louis de Broglie et la coexistence des ondes et des corpuscules,* Revue du Palais de la Découverte, **10**, 1982, p. 17.
[12] *La non séparabilité substitut moderne de l'indéterminisme copenhaguien*, in : *The concept of reality*, « I. Zacharopoulos », Athens, 1983.
[13] *Physique et métaphysique en mécanique quantique et chez Bernard d'Espagnat*, Revue de Métaphysique et de Morale, 1/1983, p. 85.
[14] *La géométrisation de la physique*, Séminaire de Philosophie et Mathématique, ENS, Paris, 1983.
[15] *De Broglie's initial conception of de Broglie's wave*, in : *The wave particle dualism*, 1984.
[16] *Mécanismes et régularités de la nature inanimée,* Texte de 81 pages commandé par Einaudi (Turin) pour une « Encyclopédie de la nature », projet abandonné en raison de difficultés financières de l'Editeur, 1984.
[17] *Point d'orgue sur une controverse avec B. d'Espagnat*, Revue de Métaphysique et de Morale, 1/1985, p. 400.
[18] Préface à la 3ième édition de *La physique nouvelle et les quanta*, par Louis de Broglie, Flammarion, « Champs », 1986.
[19] *A propos de deux mémoires d'Einstein sur la géométrie de l'espace de configuration en mécanique classique* , Annales de la Fondation Louis de Broglie, **11**, 1986, p. 253.
[20] *Temps physique et irréversibilité*, Revue du Palais de la Découverte, **14**, 1986, p. 65.
[21] *Louis de Broglie (1892-1987),* Nécrologie, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **12**, 1987, p. I àIX.
[22] *Louis de Broglie (1892-1987),* Nécrologie (texte différent du précédent), en allemand Physikalische Blätter, **43**, Nr6, 1987 (en allemand) ; même texte en anglais dans : Foundations of Physics, **17**, 1987, p. 967.
[23] *Convergence and divergence between the ideas of de Broglie and Schrödinger in wave mechanics*, Foundations of physics, **17**, 1987, p. 1189.
[24] Préface à *Louis de Broglie, un itinéraire scientifique*, (voir : IV [7]), 1987.
[25] *Une certaine idée de la science,* contribution à : *Louis de Broglie que nous avons connu* (IV, [7]). Article traduit en ukrainien *in* : Journal ukrainien de physique, **38**, 1993, p.632.
[26] *Louis de Broglie, savant solitaire présent incognito dans notre vie quotidienne,* Revue du Palais de la Découverte, **17**, 1988, p. 29.
[27] *Les programmes de Louis de Broglie et d'Erwin Schrödinger*, in : *L'encyclopédie philosophique universelle*, PUF, Paris, 1989, Tome **1**, p. 1192.
[28] *Réflexions à l'occasion d'un bicentenaire. Qu'est-ce qu'une révolution scientifique ?* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **14**, 315, 1989.
[29] Articles *Fermat, Huygens, Newton* in : Dictionnaire du Grand Siècle, Fayard, Paris, 1990 (Direction François Bluche).
[30] *Hommage à John Bell*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **16**, 1, 1991 (en collaboration avec O. Costa de Beauregard).
[31] *Le testament de Louis de Broglie pour ses papiers scientifiques et sa bibliothèque*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **18**, 1993, p. 355.
[32] *La bibliothèque de Louis de Broglie*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **18**, 1993, p. 363 (en collaboration avec A.S. Guénoun).

[33] *Destouches physicien*, Préface aux travaux scientifiques de J.L. Destouches pour ses Œuvres choisies, Editions du C.N.R.S., 1994 (Editeurs P. Février et H. Barreau).
[34] *Einstein et les quanta,* Ciel et Espace, novembre 1994, p. 64.
[35] *D. Bohm, Jacob Terletsky, Asim Barut, quelques souvenirs personnels sur des amis disparus*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **20**, 1995, p. 513.
[36] *Note de lecture sur la traduction française du Newton de Richard Westfall* (Cambridge University Press, 1980), parue chez Flammarion, « Figures de la science », Paris, 1994, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **20**, 1995, p. 118.
[37] *Pierre Curie et la symétrie,* Séminaire « Philosophie et mathématique », ENS 1995.
[37] Introduction à *Diverses questions de mécanique et de thermodynamique,* par Louis de Broglie (voir : IV [8]), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **21**, 1996, p. 117 (en collaboration avec M. Karatchentzeff et D. Fargue.
[38] *Huygens, Newton et la umière*, Revuedu Palais de la Découverte, **24,** N°240, p.41.
[39] *«Les recettes qui réussissent toujours* », Contribution au Colloque : « Valéry et le partage de midi », Collège de France 1995, Textes réunis par Jean Hainaut, Honoré Champion Editeur, Paris, 1998.
[40] *De la fécondité de l'ennui*, Contribution au recueil : « L'ennui. Féconde mélancolie » (dirigé par Didier Nordon), Editions Autrement, Collection Mutations, Paris, 1998.
[41] *Platon est-il mort ?* Revue « Quadrature », 1998.
[42] *Pourquoi les mathématiques sont-elles efficaces ?* Contribution au « Dictionnaire de l'ignorance » (dirigé par Michel Cazenave), Editions Albin-Michel, Paris, 1998.
[43] *La petite étoile qui devint une supernova,* Revue Sciences (Association Française pour l'Avancement des Sciences), N°99-2 , 1999.
[44] *Quelques souvenirs un peu fragmentaires mais chaleureux d'un ami disparu : Takehiko Takabayasi*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **24**, 1999, p. 1.
[45] *Souvenirs de Louis Néel (22-11-1904, 17-11-2000),* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **25**, 2000, p. 269.
[46] *Olivier Costa de Beauregard, homme de science et esprit libre (Introduction à son livre jubilaire)*, Annales de la Fondation Louis de Broglie **28**, 2003, p.277.
[47] *Michel Cazin (18 avril 1923-30 août 2003),* Annales de la Fondation Louis de Broglie **29**, 2004, p.1.
[48] *Louis de Broglie, Sa conception du monde physique* (Conférence d'ouverture du Colloque réuni à l'Institut Henri Poincaré les 1er et 2 décembre, 2003), Annales de la Fondation Louis de Broglie **29**, 2004, p.749.
[49] *Finalement, qui a découvert la Relativité ? Einstein, ou Poincaré ? Einstein, bien sûr et personne d'autre !* Revue de l'Electricité et de l'Electronique, N°5, mai 2005, p.25 et : Annales de la Fondation Louis de Broglie **30**, 2005, p.1.
[50] *En mémoire d'un précieux ami : Olivier Costa de Beauregard*, *quelques souvenirs,* Annales de la Fondation Louis de Broglie **32**, 2007, p.1.
[51] *Souvenirs de l'Institut Henri Poincaré,* Annales de la Fondation Louis de Broglie **33**, 2007, p.197.
[52] *Une nouvelle théorie du monopôle magnétique avec un aperçu sur ses effets physiques, chimiques, biologiques et nucléaires,* Revue de l'Electricité et de l'Electronique, n°9, 2005, p.23 (reproduit dans : Annales de la Fondation Louis de Broglie **33**, 2008, p.1).

III THÈSE DE DOCTORAT

Problèmes sur le groupe des rotations et la toupie quantique. Cahiers de Physique, **13**, 1959. Le sujet de cette thèse était inspiré par des recherches poursuivies dans notre groupe de l'Institut Henri Poincaré sur une classification des particules élémentaires mais je l'ai volontairement limitée aux

problèmes énoncés dans son titre. L'intérêt de ces problèmes s'est révélé avec le monopôle magnétique, dont les lois sont parentes de celles d'une toupie quantique.

IV OUVRAGES

[1] *Quanta grains et champs*, L'Univers des Connaissances, Hachette, Paris, 1969, en collaboration avec J. Andrade e Silva, Préface de Louis de Broglie [traduit en allemand, anglais, américain, espagnol, italien, japonais, néerlandais, portugais, russe].
[2] *12 clés pour la physique*, Editions Augustin Fresnel, Paris, 1982 [traduit en italien].
[3] *Louis de Broglie, un itinéraire scientifique* (textes réunis et présentés par G .Lochak), Editions la Découverte, Paris, 1987.
[4] *L'objet quantique*, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Flammarion, Paris, 1989, en collaboration avec S. Diner et D. Fargue. Même ouvrage en Collection Flammarion « Champs ».
[5] *Louis de Broglie un prince de la science*, Flammarion « Figures de la Science », Paris, 1992 (traduit en japonais et en russe). Même ouvrage en Collection Flammarion « Champs ».
[6] *La géométrisation de la physique* Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Flammarion, Paris, 1994 (traduit en russe). Même ouvrage en Collection Flammarion « Champs ».
[7] *Nonperturbative Quantum Field Theory and the Structure of the Matter*, Kluwer, Dordrecht, 2000, en collaboration avec Th. Borne et Harald Stumpf.
[8] *Défense et illustration de la science. Le savant, la science et l'ombre*, Ellipses, Paris, 2002, ouvrage inspiré du conte d'Andersen : *« L'ombre »* (traduit en russe sous le titre *« La science et l'ombre »*).
[9] *Voyage au centre de la science au XX° siècle. Sur les traces de Louis de Broglie*, Hermann, Paris, 2008 (traduit en russe).

V EDITIONS.

[1] *Louis de Broglie sa conception du monde physique,* Ed. M. Cazin et G. Lochak, Gauthier-Villars, Paris, 1973.
[2] *Les incertitudes d'Heisenberg et l'interprétation de la mécanique ondulatoire*, par Louis de Broglie, avec des Notes critiques de l'auteur. Introduction et Notes de G. Lochak. Ed. : G. Lochak, S. Diner et D. Fargue, Gauthier-Villars, Paris, 1982. [Traduit en russe : Editions « Mir », Moscou, 1986, et en anglais avec un avant-propos de A. Barut : Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990].
[3] *La pensée physique en 1980* , Editions Augustin-Fresnel, Paris, 1982
Comptes rendus d'un Congrès réuni à Peyresq (Haute-Provence) en 1980. Ed. : S. Diner, D. Fargue, G. Lochak, publié par : Editions Augustin Fresnel, 1986.
[4] *The Wave-Particle dualism (a Tribute to Louis de Broglie on his 90th Birthday),* Comptes rendus d'un Congrès réuni en Italie à la Villa Colombella, Perugia, en 1982. Ed. : S. Diner, D. Fargue, G. Lochak, F. Selleri, publié par D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1984.
[5] *Dynamical Systems a Renewal of Mechanics (Centennial of G. D. Birkhoff),* Comptes rendus d'un Congrès réuni à Peyresq (Haute-Provence) en 1984. Ed. : S. Diner, D. Fargue, G. Lochak, publié par World Scientific Publishing Co, Singapore, 1986.
[6] *Information, Complexity and Control in Quantum Physics*, Comptes rendus d'un Congrès réuni à Udine (Italie) en 1985. Ed. : A. Blaquière, S. Diner, G. Lochak, publié par Springer Verlag, Wien, 1987.
[7] *Louis de Broglie, un itinéraire scientifique*, textes de Louis de Broglie choisis et introduits par G. Lochak, La Découverte, Paris, 1987.
[8] *Louis de Broglie que nous avons connu*, Bibliothèque des Annales de la Fondation Louis de Broglie, Paris, 1988.

[9] *Courants, amers, écueils en microphysique* (ouvrage collectif), Bibliothèque des Annales de la Fondation Louis de Broglie, Paris, 1993.
[10] *Diverses questions de mécanique et de thermodynamique classiques et relativistes* par Louis de Broglie (d'après un manuscrit inédit). Edition et Préface de G. Lochak, M. Karatchentzeff et D. Fargue, Springer, Berlin, 1995.

VI - PUBLICATIONS SUR LE MONOPÔLE MAGNÉTIQUE ET LA THÉORIE DE LA LUMIÈRE (extraits des listes précédentes)

[1] *Paramètres relativistes de Cayley-Klein dans l'équation de Dirac*, C. R. Acad. Sci., **243**, 1956, p. 234, en collaboration avec G. Jakobi.
[2] *Décomposition de l'impulsion de Dirac et invariance de jauge*, C. R. Acad. Sci., **243**, 1956, p. 357, en collaboration avec G. Jakobi.
[3] *Sur un monopôle de masse nulle décrit par l'équation de Dirac, et sur une équation générale non linéaire qui contient des monopôles de spin 1/2* (1ière partie), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **8**, 1983, p. 345
[4] *Même titre*, (2ième partie), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **9**, 1984, p. 5.
[5] *Wave equation for a magnetic monopole*, IJTP, **24**, 1985, p. 1019.
[6] *The symmetry between electricity and magnetism and the wave equation of a spin 1/2 magnetic monopole*, in : Information, complexity and control in quantum physics, 1987.
[7] *Etats électriques et états magnétiques dans le champ de Majorana*, (Première partie : états électriques), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **12**, 1987, p. 135
[8] *Nonlinear Spinorial Wave Equation for a Magnetic Monopole,* in : *Nonlinear World*, International Workshop on Nonlinear and Turbulent Processes in Physics, Kiev 1989, World Scientific, Singapore, 1990.
[9] *Sur un modèle d'équation spinorielle non linéaire*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **16**, 1991, p. 43, en collaboration avec C. Daviau.
[10] *Un monopôle magnétique dans le champ de Dirac* (*Etats magnétiques du champ de Majorana*), Annales de la Fondation Louis de Broglie, **17**, 1992, p. 203.
[11] *Sur les solutions localisées d'une équation non linéaire représentant un monopôle magnétique*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **18**, 1993, p. 1, en collaboration avec E. Maslov.
[12] *Sur la présence d'un second photon dans la théorie de la lumière de Louis de Broglie*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, **20**, 1995, p. 111.
[13] *The Symmetry between Electricity and Magnetism and the Problem of the Existence of a Magnetic Monopole,* contribution au recueil : *Advanced Electromagnetism,* Ed. T.W. Barrett, D.M. Grimes, World Scientific, Singapore, 1995, *p. 105-148.*
[14] *Les symétries P,T,C, les solutions à énergie négatives et la représentation des antiparticules dans les équations spinorielles, partie I,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **22**, 1997, p. 1.
[15] *Les symétries P,T,C, les solutions à énergie négatives et la représentation des antiparticules dans les équations spinorielles, partie II,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **22**, 1997, p. 187.
[16] *Sur un déplacement des franges d'interférences électroniques dans un potentiel magnétique sans champ,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **25**, 2000, p. 107 (Traduit en russe dans Prikladnaja fizika, 2-2003, p. 5).
[17] *Un lepton magnétique capable d'intervenir dans les interactions faibles,* Annales de la Fondation Louis de Broglie **27**, 2002, p. 727, complément à l'article d'Urutskoiev et al., A.F.L.B. **27**, 2002, p. 701. Traduit en russe : Prikladnaja fizika, **3**-2003, p.10
[18] *L'équation de Dirac sur le cône de lumière : Electrons de Majorana et monopôles magnétiques*, Annales de la Fondation Louis de Broglie **28**, 2003, p. 403.

[19] *Sur un déplacement des franges d'interférences électroniques dans un potentiel magnétique sans champ,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **25**, 2000, p. 107 (Traduit en russe dans Prikladnaja fizika, 2-2003, p. 5).
[20] *A new theory of the Aharonov-Bohm effect, (English version of* [101]*),* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **27**, 2002, p. 529.
[21] *« Photons électriques » et « photons magnétiques » dans la théorie du photon de de Broglie (un renouvellement possible de la théorie du champ unitaire d'Einstein),* Annales de la Fondation Louis de Broglie **29**, 2004, p. 297.
[22] *Quelques questions à propos de la formule de Dirac pour la charge d'un monopôle magnétique,* Annales de la Fondation Louis de Broglie, **27**, 2004, p. 695 (Traduit en russe dans Prikladnaja fizika, **6**-2004 p. 5.
[23] *Low-Eenergy Nuclear Reactions and Leptonic Monopoles,* en collaboration avec Leonid Urutskoev, Conférence Internationale sur la Fusion Froide (ICCF 11), Marseille 31.10.04 au 05.11.04, 2004.
[24] *Theory of Light Monopoles and their Physical, Chemical, Biological and Nuclear Effects,* Conférence Internationale sur la Fusion Froide (ICCF 11), Marseille 31.10.04 au 05.11.04. Traduit en russe dans Prikladnaja fizika, 2006 p. 5.
[25] *The Equation of a Light Leptonic Magnetic Monopole and its Experimental Aspects*, Z. Naturforsch. **62a**, 2007, p.231.
[26] *Twisted space, chiral gauge and magnetism*, Ann. Fond. Louis de Broglie**, 33**, **32,** 2007, p. 125, (traduction russe dans « Prikladnaja Fizika »).

[27] *Sur la présence de monopôles magnétiques légers au pôle Nord* G. Bardout, G. Lochak, D. Fargue, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **32**, 2007, p. 551.
[28] *A Leptonic Magnetic Monopole : Theory and Experiment,* Colloque de Peyresq 2007, *Ann. Fond. Louis de Broglie*, **33**, 2008, p.1.
[29] *Groupe des rotations et représentations*, Ann. Fond. Louis de Broglie**, 33**, 2008, (traduction russe dans « Prikladnaja Fizika »)

[30] « *Photon Electriques » et « Photons magnétiques ». Un renouvellement possible de la théorie du champ unitaire d'Einstein.* Annales de la Fondation Louis de Broglie **33**, 2008, p.107 (réédition complétée de l'article : [107]).
[31] *A theory of light with 4 different photons : Electric and magnetic, with spin 1 and 0,* Prikladnaja Fisika, 2010 **(**in russian).
[32] *A new electromagnetism based on 4 photons : electric, magnetic, with spin 1 and spin 0.*
(Part I : Optics) Annales de la Fondation Louis de Broglie, **35,** 2010, p. 1-21
[33] *A new electromagnetism with 4 different photons* (Part II : Gravitation). Annales de la Fondation Louis de Broglie, **36**, 2011, p. 1 (tr.in Russian, in Prikladnaja Fisika).

VII BRÈVE INTRODUCTION À LA THÉORIE DU MONOPÔLE

Je reviens maintenant un peu plus longuement à mes travaux de cette dernière liste, qui se sont étendus sur les 30 dernières années. **Mon principal résultat a été la prévision théorique des lois de symétrie prévues par Pierre Curie et des propriétés physiques d'un monopôle magnétique leptonique :** c'est-à-dire d'un monopôle très léger, voire de masse nulle pour l'équation linéaire.

Et cela, **contrairement à la croyance générale en un monopôle extraordinairement lourd** une croyance, émise par Dirac pour expliquer qu'aucun monopôle n'avait jamais été observé. **Mon monopôle, très léger ou de masse nulle n'aurait pas eu cette excuse.** Mais justement, dès qu'on l'a cherché il s'est révélé à de nombreuses observations.

Ma théorie a ensuite été développée dans de nouvelles directions par **Harald Stumpf**, Professeur à **l'Université de Tübingen**, ancien proche collaborateur de Werner Heisenberg, comme je le fus pour Louis de Broglie. Stumpf a fait notamment la théorie de la formation des monopôles au cours de

phénomènes électriques de rupture ; il a montré que le phénomène type est la radioactivité bêta, dont les phénomènes de rupture habituellement utilisés sont des substituts.

L'existence des monopôles a été largement confirmée par des expériences, presque toutes réalisées en Russie, principalement sous la direction ou sous l'inspiration de **Léonid Urutskoiev**, professeur à l'Université de Moscou. Ce dernier avait été envoyé par **l'Institut Kurchatov**, dont il était membre, à Tchernobyl en vue d'élucider les causes de la catastrophe, mais il a fait mieux : grâce à ses seules observations, il a découvert indépendamment de moi (avec un certain retard sans importance) la nécessaire existence de tels monopôles. Nous avons été réunis par des amis communs de **l'Institut de Recherches Nucléaires de Doubna,** dont je suis un ancien chercheur, et nous sommes arrivés à la conclusion que nous parlions de la même chose ; nous collaborons depuis lors. Un autre grand centre russe de recherche est un laboratoire de l'Université de Kazan, sous la direction de **Nicolas Ivoilov**. Enfin, il y a un laboratoire en France, à **l'Ecole Centrale de Nantes**.

Il est intéressant de raconter comment m'est venue l'idée des monopôles magnétiques leptoniques. L'origine date de 1956. Nous étions nombreux à l'Institut Henri Poincaré - y compris de Broglie lui-même - à travailler sur l'équation de Dirac. J'ai remarqué que tout est angulaire dans cette théorie, à cause du spin évidemment. C'est pourquoi j'ai eu l'idée d'exprimer l'équation uniquement avec des angles et une densité. Il fallait **une densité scalaire et 7 angles** : 3 angles d'Euler pour les rotations d'espace, 3 angles imaginaires d'espace-temps pour les vitesses ; et un angle étrange, que je désigne par A, introduit par Yvon et Takabayasi[3]. Cet angle joue un rôle important dans l'équation de Dirac. Il intervient de façon claire dans certaines représentations de l'équation, mais son sens physique restait assez mystérieux à l'époque. Il est égal à l'arc-tangente du rapport des deux invariants de Dirac, c'est donc un pseudo - invariant relativiste :

$$A = Arctg\, \Omega_2 / \Omega_1$$

Les équations angulaires que j'ai obtenues, sont plus compliquées que l'équation de Dirac à laquelle elles sont équivalentes, mais deux d'entre elles sont simples. Ce sont des crochets de Poisson classiques, dont le premier s'écrit :

$$\left[\varphi / 2, J_4\right] == \delta(r - r'); \quad \text{où l'on a:}$$

$\varphi =$ angle polaire, $J_\mu = i\overline{\psi}\gamma_\mu\psi = \left\{J_4, J_k\right\}$ est un vecteur polaire du genre temps et l'on a :

$J_4 =$ densité de charge, $J_k =$ densité de courant, $r =$ rayon vecteur

Ce premier crochet est simple : il signifie la conjugaison canonique de la phase (un angle polaire) et de la densité de courant, ce qui était déjà connu en optique et signifie que le courant électrique se conserve, ce qui normal pour l'équation de l'électron. Mais tout se gâte avec le second crochet :

$$\left[A / 2, \Sigma_4\right] = \delta(r - r')$$

La phase polaire est remplacée par l'angle A défini plus haut : c'est un pseudo-invariant et bien qu'il soit lié à l'équation de Dirac il n'avait pas d'interprétation physique. Son conjugué est comme précédemment la composante de temps d'un quadri – vecteur :

$$\Sigma_\mu = i\overline{\psi}\gamma_\mu\gamma_5\psi = \left\{\Sigma_\mu, \Sigma_k\right\}$$

[3] Yvon était français, Haut-Commissaire à l'Energie Atomique. Takabayasi était japonais et travaillait chez nous à l'époque, à l'Institut Henri Poincaré (l'I.H.P. comme on l'appelle).

Mais au lieu d'un quadrivecteur polaire du genre temps, c'est un **vecteur axial** (un pseudo - vecteur) du **genre espace,** dont la quatrième composante ne saurait donc être une densité de charge analogue à la précédente. Quant aux composantes d'espace, elles avaient à l'époque une interprétation admise par tout le monde : c'était la **densité de spin** et on s'accordait à fermer les yeux sur la quatrième composante du quadrivecteur, réputée incompréhensible.

Les deux crochets de Poisson que j'avais trouvés étaient semblables, mais on ignorait la signification des deux termes présents dans le second. J'y ai longuement réfléchi sans rien y comprendre avant de me décider (j'étais un jeune chercheur) à en parler à Louis de Broglie qui a eu trois attitudes que j'ai trouvées remarquables de la part d'un grand patron : 1) Il a refait tous mes calculs qui ont dû lui prendre beaucoup de temps. 2) Il m'a avoué qu'il ne comprenait rien à ma seconde formule. 3) Il m'a dit : « Tant pis, on publie comme ça, puisque c'est une conséquence logique de l'équation de Dirac ; j'espère qu'on comprendra un jour ». Et ma note est passée aux Comptes Rendus de l'Académie.

Durant 23 ans, je consacrais vainement quelques jours par an à ce problème, jusqu'à ce que survienne un colloque en l'honneur de René Thom, où j'ai présenté ce problème comme étant l'une des surprises de la géométrisation de la physique ; et il m'a soudain sauté aux yeux pendant mon exposé que l'objet bizarre caché dans mes formules était un **monopôle magnétique**.

Voici les trois équations différentielles que j'ai trouvées pour le monopôle :

$$\boxed{\gamma_\alpha\left(\partial_\alpha - \frac{g}{\hbar c}\gamma_5 B_\alpha\right)\psi = 0}$$

$$\gamma_\alpha\left(\partial_\mu - \frac{g}{\hbar c}\gamma_5 B_\alpha\right)\psi + i\frac{\mu(\rho)c}{\hbar}\frac{\Omega_1 - i\gamma_5\Omega_2}{\sqrt{\Omega_1^2+\Omega_2^2}}\psi = 0, \quad \rho = \sqrt{\Omega_1^2+\Omega_2^2}$$

$$\gamma_\alpha\left(\partial_\mu - \frac{g}{\hbar c}\gamma_5 B_\alpha\right)\psi + i\frac{m_0 c}{\hbar}\, e^{i\theta}\gamma_2\psi^* = 0$$

Et voici pour mémoire l'équation de Dirac pour comparer :

$$\gamma_\alpha\left(\partial_\alpha + \frac{ie}{\hbar c}A_\alpha\right)\psi - \frac{m_o c}{\hbar}\psi =$$

Dans les équations du monopôle la différence est dans la matrice pseudo scalaire γ_5 caractéristique du magnétisme, et dans le potentiel axial B_α qui se substitue au potentiel polaire de Lorentz A_α. Les trois équations que j'ai trouvées satisfont aux lois de symétrie de Curie et conservent le courant magnétique, mais il faut remarquer que la seconde n'est pas une équation mais une classe d'équations dans laquelle $\mu(\rho)$ est une fonction arbitraire. La première des trois équations est encadrée car elle est linéaire, donc plus simple que les autres et elle s'est montrée suffisante jusqu'ici dans tous les problèmes traités. **Mais il faut aussi remarquer que le magnétisme ne se conserve dans ces équations qu'en présence de champs électromagnétiques continus et non dans l'interaction entre charges électriques et magnétiques.** C'est un point que j'étudie au moment où sont écrites ces lignes.

L'équation linéaire prend une forme simple et suggestive en représentation de Weyl. Considérons le changement de variables suivant qui fait intervenir deux spineurs à deux composantes :

$$\Psi \rightarrow U\Psi = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}; \; U = U^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\gamma_4 + \gamma_5); \; \gamma_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}; \; \gamma_5 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

La transformation U échange γ_4 et γ_5, elle scinde l'équation linéaire en deux équations indépendantes (voir Bibliographie) : les ondes à deux composantes ξ et η, ainsi que leurs équations respectives, sont gauche et droite et sont l'image l'une de l'autre dans un miroir :

$$\boxed{\begin{aligned} &\left[\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t} - \mathbf{s}.\nabla - i\frac{g}{\hbar c}\left(W + \mathbf{s}.\ \mathbf{B}\right)\right]\xi = 0 \\ &\left[\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{s}.\nabla + i\frac{g}{\hbar c}\left(W - \mathbf{s}.\ \mathbf{B}\right)\right]\eta = 0 \end{aligned}}$$

On a donc deux monopôles - gauche et droit - P symétriques l'un de l'autre (Pierre Curie qui n'a jamais vu ces équations le savait déjà !) et l'on montre que ces monopôles sont en outre conjugués de charge magnétique. On reconnaît aussi que les premières moitiés de ces deux équations, qui ne dépendent ni de la charge ni des champs, ne sont autres que les équations du neutrino à deux composantes, elles aussi gauche et droite.

Le monopôle magnétique leptonique est donc un neutrino magnétiquement chargé. J'ai pu prédire – et c'est expérimentalement vérifié – qu'outre la charge magnétique ce monopôle est doté d'interactions faibles comme le neutrino. Grâce à sa charge magnétique, les interactions faibles dont il est porteur et qui agissent dans le domaine nucléaire, seront manœuvrables par des forces électromagnétiques, en quoi le monopôle l'emporte radicalement sur le neutrino.

Voici maintenant quelques pages sur les principaux résultats expérimentaux :

VIII EFFETS NUCLÉAIRES, CHIMIQUES, BIOLOGIQUES ET COSMOLOGIQUES

1 - Introduction :

Le monopôle magnétique a été imaginé par Maxwell (1873), et ses lois de symétrie ont été décrites par Pierre Curie (1894). Dirac (1931) a calculé sa charge à partir de celle de l'électron, et il a supposé qu'il devait être très lourd, pour expliquer qu'on ne l'observait pas. C'est ainsi que le monopôle devenu une particule mythique, un serpent de mer inobservable. Mais c'est faux. Le monopôle dont nous parlons, prévu théoriquement (bibliographie : Lochak 1983) et indépendamment observé quelques années plus tard (Urutskoiev), est au contraire sans masse ou très léger, comme le photon ou le neutrino **:** il a été expérimentalement produit et observé.

2 - Quelques mots sur la théorie :

Elle n'est pas basée sur l'hypothèse du monopôle de Dirac mais sur sa théorie de l'électron. La théorie consiste à prouver que l'équation de Dirac possède, outre son versant électrique connu, **un second versant qui est magnétique**. Il s'agit d'une particule sans masse (dans le cas linéaire), comme le neutrino, avec les lois de symétrie prévues par Curie depuis plus d'un siècle.

Contrairement aux autres théories du monopôle qui le rattachent aux « interactions fortes » régnant dans le noyau atomique, ce nouveau monopôle est doué « d'interactions faibles », comme le neutrino et la radioactivité bêta, au cours de laquelle sont émis des électrons et des neutrinos.

Mais personne, avant 1983, ne s'était avisé qu'il existe, pour l'équation de Dirac, une seconde et une seule dérivée covariante autre que celle qui donne l'équation de l'électron, et qui donne un *monopôle magnétique*.

3 - Raisons théoriques en faveur du monopôle.

1) Tout d'abord, on trouve que la charge de la particule est obligatoirement une charge magnétique, pour des raisons de symétrie.
2) Toutes les lois de symétrie sur l'espace, le temps et la charge sont celles de Curie.
3) Les forces d'interaction électromagnétiques ne dérivent pas des potentiels de Lorentz mais de **pseudo-potentiels** qui apparaissent pour des raisons d'invariance de jauge dans les équations du monopôle, qu'on retrouve dans ma théorie du « photon magnétique », qui étaient déjà présents, sans avoir été interprétés, dans la théorie de la lumière de de Broglie et qui font partie intégrante de ma théorie de la lumière qui généralise celle de de Broglie.
4) Les courants électrique et magnétique, qui se conservent en vertu de l'équation, ont une forme qui élimine une objection contre l'hypothèse du monopôle magnétique (bibliographie).

A l'approximation de la mécanique classique, les équations du monopôle tendent vers l'équation de Poincaré qui rend compte de l'effet Birkeland. Cet effet consiste en ce qu'un pôle d'aimant (donc un monopôle fixe) focalise les électrons dans un tube de Crookes : une vieille expérience du XIX° siècle qui fut expliquée par une équation de Poincaré (Bibliographie). Par symétrie, les monopôles légers doivent en faire autant dans le champ créé par une charge électrique fixe. C'est ce que dit mon équation du monopôle qui se ramène, à l'approximation classique, à l'équation de Poincaré ; et on a là *une première confirmation expérimentale de la théorie* (même si elle est indirecte : il s'agit simplement de deux effets inverses l'un de l'autre).

J'ai donné la version quantique du raisonnement de Poincaré. De là, on trouve que les phénomènes d'interaction entre un monopôle magnétique et une charge électrique se ramènent aux lois du mouvement d'une toupie symétrique obéissant à la mécanique quantique. **On s'aperçoit qu'un cône introduit par Poincaré n'est autre que le cône de Poinsot de la toupie.** Et de là, se déduit, sous une forme simple et plus générale, la relation de Dirac dont nous parlions plus haut, qui relie la charge électrique à la charge magnétique.

Enfin, nous avons vu que **le monopôle décrit ici est un neutrino magnétiquement excité.** On a montré en effet (Ivoilov) qu'un corps radioactif β dans un champ magnétique peut émettre avec l'électron, un monopôle magnétique au lieu d'un neutrino. Ce qui est la première preuve que le monopôle intervient (jusqu'à y naître !) dans une réaction nucléaire faible.

4 - Preuves expérimentales du caractère magnétique du monopôle : Les premières expériences datent de 1998 à l'Institut Kurtchatov, à Moscou, sous la direction de *Léonid Urutskoiev*. Ce dernier reste l'inspirateur d'une tendance, développée également à l'Institut Unifié de Reherches Nucléaires de Doubna, sous la direction de *Vladimir Kouznetsov*, à l'Institut de Physique Générale de L'Académie des Sciences de Russie, sous la direction d'*Henri Rukhadze,* et à l'Université de Kazan, sous la direction de *Nicolas Ivoïlov* (membre de l'équipe d'Urutskoiev).

Comme il arrive souvent, ce n'est pas le résultat principal, en l'occurrence le magnétisme, mais un second effet, *les interactions faibles*, qui a attiré l'attention d'autres physiciens.

L'équipe d'Urutskoiev a découvert une *redistribution des isotopes* dans des feuilles de titane, sous l'effet de décharges électriques ($0{,}1\,ms$, 5 kV, 60 kJ) en milieu liquide, ainsi que *l'apparition d'éléments chimiques initialement absents*. Cela sans aucune radioactivité. L'effet est répétable avec une grande précision. Le caractère nucléaire de l'effet observé, l'absence d'interactions fortes et les basses énergies mises en jeu ont suggéré le rôle *d'interactions faibles*, mais la petite section efficace de ces dernières a suggéré d'emblée un effet *catalyseur* qui s'est confirmé par la suite.

Le phénomène observé produisait donc un rayonnement en partie magnétique, qui entraînait des transmutations nucléaires identifiées par spectrographie de masse sur les débris de titane. Mais il

transporte « autre chose » : des *particules*, qui laissent sur les émulsions photographiques des *traces* que les spécialistes n'avaient encore jamais rencontrées : discontinues, épaisses, en forme de chenilles. Elles correspondraient à 1 Gev pour une charge électrique, ce que dément l'absence d'électrons δ et le fait que les particules traversent des mètres d'air et d'autres matériaux. Elles ne sont donc pas électriques, mais pas neutres puisqu'elles laissent des traces et que les particules neutres n'en laissent pas. Il était naturel, étant donné les effets magnétiques observés, d'y voir un effet des charges magnétiques déjà enregistrées autrement.

L'analyse récente de ces traces au **microscope confocal par Daniel Fargue** montre que les traces observées sont, en réalité, des « gravures » dans l'épaisseur des pellicules photographiques.

Ces particules réagissent à un champ magnétique :

1) Un *champ magnétique* de *20 œrsteds* appliqué à la source du rayonnement transforme complètement les traces en des sortes de *« comètes »* même à plusieurs mètres de la source (Urutskoiev).

2) Les particules en question sont focalisées par des bobines magnétiques, qui créent ainsi des faisceaux : c'était le cas chez Ivoilov, avec des bobines de Helmholtz et chez nous avec l'accélérateur dont nous avons déposé un brevet et qui est en construction.

3) Il se trouve que l'élément le plus sensible à *l'effet Mössbauer* est en même temps magnétique : c'est le fer cinquante-sept Fe^{57}, qui est un *piège à monopôles*. Un échantillon de Fe^{57} est soumis au rayonnement (supposé) des monopôles à quelques mètres de la source ; un pôle d'aimant derrière la cible écarte les monopôles d'un signe et attire les autres. On retire ensuite l'échantillon et l'on étudie par effet Mössbauer sa raie γ caractéristique *: la raie est nettement déplacée*. On recommence l'expérience en changeant le pôle d'aimant : *le déplacement est dans l'autre sens.* Ce qui suggère évidemment qu'on a successivement piégé les monopôles nord et sud dans un mélange incident (Urutskoiev et Ivoilov).

4) Ce qui précède montre en outre que le rayonnement des monopôles crée un *magnétisme induit durable*. Car l'irradiation avait lieu à Moscou, au laboratoire d'Urutskoiev et la mesure Mössbauer au laboratoire d'Ivoïlov à Kazan, après des heures de transport par avion de l'échantillon de fer : Fe^{57}.

Autre signe de magnétisme induit, on a remarqué que les débris de titane, après une décharge électrique, sont attirés par un aimant (le titane n'est pas un métal magnétique). Par ailleurs, on a constaté qu'une boîte de Piétri irradiée à quelques mètres de la source, puis éloignée et conservée dans une armoire sur une émulsion photographique enveloppée dans du papier noir, fait apparaître dans l'émulsion les traces caractéristiques en chenilles (observation dédiée aux mânes d'Henri Becquerel !).

L**es effets induits par les monopôles disparaissent au bout de trois jours** : signe d'une *durée de vie*, que la théorie ne prévoit pas. Seuls subsistent les transitions nucléaires ou chimiques.

Autres effets à distance :

a) *Action chimique* : les monopôles *détruisent du nitrate d'ammonium* (NH_4NO_3) *à plusieurs mètres* de distance : expériences réalisées, à la suite de la catastrophe AZF de Toulouse, par L. Urutskoiev. Le but était de vérifier s'il était possible qu'une forte décharge électrique, en émettant un flot de monopôles, mette le feu à distance à un stock de nitrates. L'idée est venue de ce que le même soupçon a été émis auparavant à propos d'une explosion électrique survenue dans la salle des machines de Tchernobyl quelques secondes avant la catastrophe nucléaire, et qui semble en être la cause en envoyant un flot de monopôles dans le réacteur.

Dans les deux cas, la réponse est positive quant à la possibilité, mais sans prouver qu'il en a été véritablement ainsi. En tout cas, l'expérience sur le nitrate d'ammonium prouve l'action à distance des monopôles.

b) *Action biologique* : Une équipe de biologistes dirigée par **Pryakhine**, de l'Université de Chelyabinsk, a pratiqué des expériences en collaboration avec Urutskoiev. Ils ont soumis des souris au rayonnement des monopôles, à une distance de 1 m de la source et ont constaté que le rayonnement augmente le nombre de cellules dans la moelle osseuse par augmentation de la division cellulaire. Le rayonnement ne semble pas produire d'effet génotoxique, mais il conduit, au contraire, à faire décroître dans un rapport 3/2 l'effet genotoxique d'une radiation γ survenue par la suite. Des expériences récentes d'Ivoilov sont en cours de publication aux AFLB.

c) *Les images chirales* : A Kazan, Ivoïlov a créé des monopôles de plus faible énergie que ceux d'Urutskoiev. Ils laissent les mêmes traces dans les émulsions photographiques, mais de forme plus tourmentée.

En outre, Ivoïlov a créé un miroir à monopôles qui permet de distinguer sur la même pellicule, la trace « aller » d'un monopôle *vers* le miroir, de la trace « retour ». Les deux traces sont *identiques* à de légères déformations près. Le fait qu'elles soient identiques (et non pas inversées comme le seraient des images optiques) est une marque de la *chiralité du monopôle*[4], prévue par la théorie. Elles sont tournées de 180° l'une par rapport à l'autre dans le plan de l'image, ce qui est une autre preuve de la chiralité. Tout ceci montre combien la théorie du monopôle est dominée par les lois de symétrie, comme l'avaient parfaitement compris Maxwell et Curie et comme les équations d'onde que j'ai trouvées le confirment.

L'enrichissement de l'uranium :

Urutskoiev a fait des expériences *d'enrichissement de l'uranium* : Dans une éprouvette en polystyrène comprimé, pleine d'eau, traversée par un mince conducteur de titane qui explosera sous l'effet de la décharge électrique, on dilue dans l'eau une certaine quantité de sels d'uranium (UO_2S0_4), avec la proportion naturelle des deux isotopes ^{238}U, ^{235}U, facilement mesurable grâce à la radioactivité. L'uranium s'est fortement enrichi en ^{235}U, sans transmutation de l'un des isotopes dans l'autre : ils ont varié tous les deux mais différemment. Il s'offre alors deux possibilités :

a) Soit la quantité d'isotopes ne change que dans la zone plasmatique entourant le titane.

b) Soit elle baisse dans l'ensemble de l'éprouvette et la différence est grande à l'observation : c'est la seconde hypothèse qui se confirme, qui est en faveur d'un *rayonnement émis* par le conducteur de titane, et se propageant dans l'espace.

La radioactivité β : Il existe des états nucléaires instables dont la durée de vie est influencée par l'état du cortège électronique. Ainsi, la durée de vie β du noyau du rhénium ^{187}R diminue de 3.10^{10} ans à 30 ans (rapport : 10^{-9}) si l'atome est entièrement ionisé.

Urutskoiev a rapproché cela de l'effet Kadomtsev qui consiste en la déformation du cortège électronique d'un atome dans un champ magnétique intense : l'atome prend la forme d'un cigare autour duquel s'enroulent les trajectoires électroniques. Intuitivement, l'allongement des trajectoires éloigne les électrons du noyau dans une partie de leur révolution, sorte d'ionisation partielle. Si le noyau est radioactif β, on devrait observer une réduction du temps de vie, mais il faudrait des champs magnétiques géants, de l'ordre de 10^9 œrsteds, pour l'observer.

Urutskoiev a remarqué que, contrairement à une particule électrique, un monopôle peut s'approcher très près d'un noyau et créer un champ magnétique de cet ordre. Des expériences d'Ivoilov vont dans ce sens : *le temps de vie d'un corps radioactif β diminue sous l'irradiation par des monopôles*. Mais il y a une objection : si les monopôles incidents ont une interaction faible

[4] Rappelons que la *chiralité* est la propriété, pour un objet quelconque, d'être droit ou gauche, comme la main (*keir* en grec), propriété découverte par Pasteur sur les cristaux d'acide lactique : il y a donc des monopôles gauches ou droits, ce que Pierre Curie avait prévu et que confirme ma théorie.

contraire à celle du neutrino spontanément émis lors de la radioactivité, il accélérera celle-ci et diminuera le temps de vie, mais pour une autre raison. J'ignore si on l'a vérifié.

Enfin, les monopôles légers dont nous parlons étant des états excités du neutrino, comme nous l'avons dit plus haut, on peut prévoir que, dans certains cas, un corps radioactif bêta pourrait se désintégrer en émettant un monopôle magnétique au lieu d'un neutrino. Cette prévision semble bien, elle aussi, se vérifier dans une expérience d'Ivoilov qui vient en renfort de l'idée émise depuis longtemps et vérifiée par une observation arctique.

L'observation arctique.

D'après une théorie, confirmée par l'observation, l'énergie que nous recevons du soleil est due à un cycle de réactions nucléaires qui émettent des *neutrinos* car certaines réactions du cycle sont des désintégrations β. Ces neutrinos arrivent sur terre en grand nombre, mais leur nombre est très inférieur aux prévisions théoriques. Il en existe une explication assez contournée, qui laisse place à d'autres hypothèses, dont la suivante :

Nous savons que notre monopôle est un neutrino *magnétiquement excité* qui peut se substituer au neutrino habituel si l'émission bêta dont il est issu se produit dans un champ magnétique. Comme il existe des champs intenses sur le soleil, un certain nombre de neutrinos solaires seront excités sous forme de monopôles. Il peut alors se produire ce qui suit :

1) Certains de ces monopôles peuvent être piégés par le magnétisme solaire et d'autres partir dans l'espace. Ceux qui sont piégés sur le soleil manquent à l'émission, d'où une part du déficit.

2) Parmi ceux qui partent dans l'espace, une partie ira vers la terre, comme les neutrinos. Mais comme ils sont magnétiques, ils iront le long des lignes de champ terrestre, attirés par les pôles.

Donc ceux des neutrinos créés sur le soleil qui sont mués en monopôles, iront vers les pôles de signe opposé au leur. S'ils se heurtent à une émulsion photographique, ils y laisseront les traces connues en laboratoire et l'on pourra les enregistrer lors d'une expédition polaire. Telle est l'observation suggérée à Jean-Louis Etienne qui a bien voulu emporter des pellicules. Elles revinrent porteuses des traces caractéristiques *(voir bibliographie VI 27).*

Ces monopôles attirés par les pôles manqueront à l'observation car les laboratoires ne sont pas dans les régions polaires et l'on n'y cherche pas des monopôles mais des neutrinos : ils s'ajouteront au déficit. Sans prétendre à un bilan, on voit au moins que la chose est possible.

IX LES CONSÉQUENCES OPTIQUES DU MONOPÔLE MAGNÉTIQUE LEPTONIQUE.

Nous allons revenir à la seconde grande idée de de Broglie : sa Théorie de la Lumière à laquelle nous avons, jusqu'ici, seulement fait allusion. Nous savons déjà qu'après quelques années de tâtonnements, il était parvenu à l'idée que le photon n'est pas une particule élémentaire mais qu'il résulte de la fusion de deux particules de Dirac de spin ½.

Il considéra le photon comme le centre de gravité d'une paire de telles particules de spin ½, ce qui donne un spin maximum 1 = 2 x ½ (il savait depuis longtemps que le photon a un spin 1). Comme le centre de gravité n'a pas de définition en relativité, il lui substitua une définition valable pour les ondes planes : les deux particules ont même impulsion – énergie, et il en fit un principe appliqué à toutes les ondes : le **principe général de fusion** que la suite justifiera. De Broglie arrive à deux équations dans lesquelles l'inconnue n'est plus un vecteur mais une matrice carrée 4x4, donc à 16 composantes (un changement introduit sous l'influence de deux de ses collaborateurs : Marie-**Antoinette Tonnelat** et **Gérard Pétiau**).

$$\partial_\mu \gamma_\mu \Psi - \frac{\mu_0 c}{\hbar}\Psi = 0$$

$$\partial_\mu \Psi \tilde{\gamma}_\mu - \frac{\mu_0 c}{\hbar}\Psi = 0$$

La matrice transposée est déplaisante, mais les matrices de Dirac obéissant aux relations :

$$\gamma_\mu \gamma_\nu + \gamma_\nu \gamma_\mu = 2\delta_{\mu\nu}; \quad \mu,\nu = 1,2,3,4; \quad \gamma_k = i\alpha_4\alpha_k; \quad \gamma_4 = \alpha_4; \quad \gamma_5 = \gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4$$

il s'ensuit que deux matrices - mais deux seulement - peuvent l'éliminer :

$$\tilde{\gamma}_\mu = \Lambda\gamma_\mu\Lambda^{-1}; \tilde{\gamma}_\mu = -\Gamma\gamma_\mu\Gamma^{-1}; \Lambda = \Gamma\gamma_5; \mu = 1,2,3,4$$

De Broglie, Tonnelat et Pétiau, d'une part, et Pauli de l'autre ont utilisé dans leurs calculs :

$$\Gamma = -i\gamma_2\gamma_4; \quad \Lambda = \Gamma\gamma_5 = -i\gamma_3\gamma_1$$

De Broglie et ses collaborateurs ont pris la première option, sans jamais parler de l'autre, et ils ont trouvé, grâce à un nouveau calcul basé sur une matrice matrice 4x4 au lieu du vecteur d'onde, les équations que de Broglie avait déjà obtenues tout seul par un autre procédé :

$$\text{(M)} \quad \left(\begin{array}{c} -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = rot\mathbf{E}; \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = rot\mathbf{H} + k_0^2\mathbf{A} \\ div\mathbf{H} = 0; \quad div\mathbf{E} = -k_0^2 V \\ \mathbf{H} = rot\mathbf{A}; \quad \mathbf{E} = -\mathbf{grad}V - \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}; \quad \frac{1}{c}\frac{\partial V}{\partial t} + div\mathbf{A} = 0 \end{array} \right)$$

$$\text{(NM)} \quad \left(\begin{array}{l} -\frac{1}{c}\frac{\partial I_2}{\partial t} = k_0 W; \quad \mathbf{grad}I_2 = k_0\mathbf{B}; \quad \frac{1}{c}\frac{\partial W}{\partial t} + div\mathbf{B} = k_0 I_2 \\ rot\mathbf{B} = 0; \quad \mathbf{grad}W + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0; \quad \left\{ \left(k_0 I_1 = 0;\ k_0 \neq 0 \right) \Rightarrow I_1 = 0 \right\} \end{array} \right)$$

Bien entendu, il fallait des changements de variables : simples dénominations des grandeurs de champs. Les équations (M), dites « maxwelliennes » sont les équations du photon d'Einstein et c'est un miracle de physique mathématique : les équations de Maxwell sont déduites de celles de Dirac avec une masse du photon, à quelques différences près : 1) Le courant de déplacement apparaît automatiquement grâce à la relativité : nous le savons déjà. 2) Les potentiels et l'expression des champs ne sont pas surajoutés aux équations de Maxwell : ils en font partie. En somme, tout était déjà caché dans les équations de Dirac qui apparaissent comme les équations de base de toute la théorie des particules à spin : nous le confirmerons plus loin.

En revanche, de Broglie ne savait pas quoi faire des équations « non maxwelliennes » (NM). Il a cru à un boson, mais il a vite compris que c'était faux car il aurait la masse infime du photon. C'est ici que j'interviens pour la première fois dans la théorie : curieusement je suis le premier à avoir remarqué cette évidence que, si l'on réunit deux photons de spin ½, il y aura un état 1= ½ + ½ et un état 0 = ½ - ½. Il est toujours étonnant que de telles évidences échappent à des esprits très éclairés.

Les équations « non maxwelliennes » (NM) représentent donc simplement un photon de spin 0 et j'ai montré qu'il a un sens physique car c'est lui qui apparaît dans l'effet Aharonov-Bohm.

Voici maintenant **le second pas** que j'ai fait. Nous avons vu que de Broglie et ses collaborateurs de l'époque n'avaient appliqué aux équations initiales du photon issues du principe de fusion, que la première des deux matrices :

$$\Gamma = -i\gamma_2\gamma_4; \quad \Lambda = \Gamma\gamma_5 = -i\gamma_3\gamma_1$$

Je suis parti, au contraire, de la seconde matrice et j'ai obtenu les équations :

$$\text{(M)}\left(\begin{array}{c} -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{H}'}{\partial t} = rot\mathbf{E}' + k_0^2\mathbf{B}'; \quad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial t} = rot\mathbf{H}' \\ div\mathbf{H}' = k_0^2 W'; \quad div\mathbf{E}' = 0 \\ \mathbf{H}' = \mathbf{grad}W' + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}'}{\partial t}; \quad \mathbf{E}' = rot\mathbf{B}'; \quad \frac{1}{c}\frac{\partial W'}{\partial t} + div\mathbf{B}' = 0 \end{array}\right)$$

$$\text{(NM)}\left(\begin{array}{c} -\frac{1}{c}\frac{\partial I_1}{\partial t} = k_0 V'; \quad \mathbf{grad}I_1 = k_0\mathbf{A}'; \quad \frac{1}{c}\frac{\partial V'}{\partial t} + div\mathbf{A}' = k_0 I_1 \\ rot\mathbf{A}' = 0; \quad \mathbf{grad}V' + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{A}'}{\partial t} = 0; \quad \left\{\left(k_0 I_2 = 0; \quad k_0 \neq 0\right) \Rightarrow I_2 = 0\right\} \end{array}\right)$$

On reconnaît au changement de potentiels et à la formulation des champs que c'est le pendant magnétique des équations précédentes: c'est un **photon magnétique**[5] celui qui figure dans l'équation du monopôle. Mais on reconnaît plus :

a) Dans le premier système d'équations, obtenu par mes aînés, les équations (M) de spin 1 sont les équations de Maxwell avec masse qui représentent l'électromagnétisme qui interagit avec l'électron et qui dérive du potentiel polaire de Lorentz : **c'est un photon électrique**. Au contraire, les équations (NM) de spin 0, responsables de l'effet Aharonov- Bohm, dérivent de potentiels axiaux, des pseudo – potentiels : ceux du magnétisme, ce qui n'est pas étonnant puisque c'est un effet gouverné par un solénoïde, donc par l'équivalent d'un aimant rectiligne.
b) Dans le second système, que j'ai obtenu, c'est l'inverse qui se produit. Les équations (M) de spin 1 dérivent de pseudo – potentiels : **c'est un photon magnétique**. Et c'est, au contraire, les équations (NM) de spin 0 qui dérivent de potentiels polaires comme l'était le spin 1 dans le premier cas. Il y a donc un croisement entre l'électricité et le magnétisme. Notons que cette structure apparaît grâce à la théorie de la fusion entre particules à spin, de de Broglie et qu'il doit exister un effet Aharonov-Bohm électrique, analogue à celui que nous connaissons.

En conclusion, j'ai mis en évidence quatre photons au lieu du seul photon d'Einstein connu jusque là. Mais ils se trouvaient tous dans les équations de la particule de spin maximum 1 de de Broglie

[5] Le photon magnétique a été également décrit par : D.Spehler et G.C. Marques G.C., *Int. J. Mod. Phys. A* 18, 14*, p. 2457, 2003*

dans lesquelles ce dernier n'a vu que le photon d'Einstein, celui qu'il cherchait. Les quatre photons ont un rôle spécifique :

X LA THÉORIE GÉNÉRALE DES PARTICULES À SPIN ET LES CONSÉQUENCES DU MAGNÉTISME SUR LA GRAVITATION.

Louis de Broglie a étendu ses raisonnements du photon aux particules de spin quelconque $(s = n/2)$ considérées comme la fusion de n particules de spin ½ , et qui ne sont donc pas des particules de spin *n/2* mais *des particules de spin maximum n/2* (voir Bibliographie). La plus remarquable de ces particules est **la particule maximum 2, le graviton,** étudiée en collaboration par Louis de Broglie et Marie-Antoinette Tonnelat. La principale conséquence de leur théorie est :

Le lien entre la gravitation et l'électromagnétisme : le champ unitaire au sens d'Einstein.

On sait que le champ unitaire a été la dernière grande entreprise d'Einstein à laquelle ont participé d'autres grands physiciens et mathématiciens dont Hermann Weyl. Cette entreprise a finalement échoué sous la forme qu'ils espéraient. Ce qu'on sait moins, c'est que **la seule grande réussite en ce domaine appartient à de Broglie et Tonnelat qui ne sont pas partis de la relativité générale mais de la mécanique quantique.**

Formellement, si on relie quatre champs de Dirac, on trouve grâce au théorème de Clebsch-Gordan quatre champs de spins respectifs 2, 1, 0 :

$$D_{\frac{1}{2}} \times D_{\frac{1}{2}} \times D_{\frac{1}{2}} \times D_{\frac{1}{2}} = D_2 + 3D_1 + 2D_0$$

Brièvement, le spin 2 correspond à un graviton, les spins 1 à des photons et le spin 0 à l'effet Aharonov-Bohm. Au total ces champs ont 4^4=256 composantes, dont 168 sont indépendantes[6] et qui se divisent en quatre groupes d'équations tensorielles A, B, C : A est de spin 2 ; B_1, B_2, B_3 sont de spin 1 (B_2 et B_3 sont identiques) et C est de spin zéro.

Les équations A, de spin 2, se ramènent à une approximation linéaire des équations de la gravitation d'Einstein, ce qui constitue un grand résultat même s'il n'est qu'approximatif en raison de la linéarité des équations quantiques, alors que les équations d'Einstein sont non linéaires. Ce fait suggère fortement que **les véritables équations quantiques devraient être non linéaires, ce que de Broglie a toujours supposé pour d'autres raisons qui tiennent à la structure des particules.**

Les équations B, de spin 1, sont de type maxwellien et représentent donc la lumière. Les équations C, de spin 0, d'après mon interprétation actuelle, représentent elles aussi de la lumière, mais du type de celle qui intervient dans l'effet Aharonov-Bohm.

Mais c'est dans les équations B de spin 1, qui sont au nombre de trois, que j'ai fait une importante remarque. De Broglie montre (voir Bibliographie) que les deux équations identiques B_2, et B_3 sont des équations maxwelliennes « normales » qui dérivent d'un potentiel vectoriel polaire, de Lorentz, alors que les **équations B_1 s'en distinguent, car elles dérivent d'un potentiel pseudo-vectoriel.** Dans les années quarante du siècle dernier, où il écrivait, on ne prêtait pas grande attention à cette différence et c'est un mérite de sa part de l'avoir au moins noté.

[6] Voir : L. de Broglie, La théorie générale des particules à spin, Gauthier-Villars, Paris, 1943

C'est ici que j'interviens, ayant connaissance d'une chose inconnue à l'époque, à savoir que les équations maxwelliennes B_2 et B_3 représentent, dans ma terminologie actuelle, des photons électriques (**que voient les électrons**), alors que les équations B_1 représentent un photon magnétique (**celui que voient les monopôles**).

Cette différence peut revêtir une grande importance. En effet, la démonstration que de Broglie a donnée au sujet de le lumière, à savoir que la séparation entre les équations tensorielles qui se déduisent des équations générales de la particule de spin maximum 1 n'est pas covariante relativiste, vaut également pour la particule de spin maximum 2[7]. Ce qui veut dire qu'il doit être en principe possible de réduire la force de la pesanteur dans un certain volume d'espace, par exemple au voisinage de l'aire de départ d'une fusée.

Cette idée théorique est corroborée par deux faits expérimentaux : 1) Le déplacement et la chute du couvercle du réacteur 4 à Tchernobyl, qui pesait 3,5 tonnes, ce qu'une pression interne ne peut expliquer car le calcul montre qu'une telle pression aurait fait exploser le réacteur, alors qu'il est resté intact (même la peinture interne n'était pas entamée). 2) Dans le laboratoire d'Urutskoiev, à l'Institut Kurtchatov de Moscou, la source de monopôles pesant plusieurs dizaines de kilos a été soulevée et jetée par terre. On a fait venir un gravimètre et on a pu montrer que le champ de gravitation avait, en effet, changé.

XI CONCLUSION.

Cette conclusion ne portera que sur le monopôle et quelques premières extensions car il s'agit d'un résultat sur les bases mêmes de l'électromagnétisme. En effet, par la « faute » d'Ampère (si l'on me pardonne cette légèreté !) une dissymétrie s'était introduite entre l'électricité et le magnétisme, du fait qu'Ampère a montré que le magnétisme pouvait être considéré comme un produit de l'électricité. Seuls deux grands physiciens, Maxwell et Pierre Curie, ont conservé une symétrie entre l'électricité et le magnétisme, tout en soulignant les différences qui les séparent.

Le fameux traité de Maxwell est en deux volumes (*Electricité* et *Magnétisme*) ; la théorie repose symétriquement sur deux lois de Coulomb concernant les pôles électriques et magnétiques, qui engendrent les potentiels et les champs correspondants, respectivement polaires et axiaux.

Quant à Curie, il a construit les lois de symétrie de l'électromagnétisme, avec charges et courants, et a prévu l'existence de pôles[8] magnétiques (avec leurs lois de symétrie) en parallèle avec les pôles électriques. Il a tenté de changer la symbolique de l'électromagnétisme pour distinguer les vecteurs électriques et magnétiques géométriquement différents, mais il n'a pas été suivi.

Ce que j'ai fait sur le monopôle est dans la ligne de Pierre Curie, mais avec le formalisme quantique de l'équation de Dirac. Mon équation retrouve les lois de Curie car, bien qu'analogue à celle de Dirac elle en diffère radicalement par l'introduction de la **matrice γ_5 qui échange l'espace et le temps, l'électricité et le magnétisme, et les jauges électrique et magnétique.**

Ma principale innovation est peut-être dans la généralisation de l'électromagnétisme de Louis de Broglie (théorie de la lumière et champ gravifique unitaire de de Broglie-Tonnelat), avec l'apparition de quatre photons, dont le photon magnétique, et le fait que les « équations non maxwelliennes » de de Broglie sont un photon de spin 0, responsable – on l'a vu - de l'effet Aharonov-Bohm.

J'ai montré que le photon magnétique apparaît aussi dans la théorie unitaire, d'où il suit qu'on **peut faire changer le champ de gravitation dans une zone d'espace.** L'interaction entre l'électromagnétisme et la gravitation se trouvait déjà en 1943 dans l'ouvrage cité plus haut de Louis de Broglie et cette prévision vient à la rencontre de recherches poursuivies par mon ami **Pierre Marx**, Ingénieur des fusées.

---

[7] Cette non covariance est due à ce que les états de spin se séparent dans $\mathbb{R}^3$ et non dans $\mathbb{R}^4$.
[8] Le mot « monopôle » est apparu beaucoup plus tard.

J'ai fait un grand progrès en ce sens grâce à l'équation du monopôle qui fournit des moyens de calcul, mais irradier une fusée avec des photons électriques, des électrons ou des monopôles, pourrait nuire à l'électronique de bord. Or les photons magnétiques ont une interaction moindre, d'où moins de risques. Soulignons qu'il ne s'agit pas de rêves théoriques car l'influence des monopôles est corroborée, on l'a vu plus haut, par le soulèvement du couvercle du réacteur 4 de Tchernobyl et par une mesure gravimétrique d'Urutskoiev à l'Institut Kurchatov. Il faut d'autres travaux pour appliquer ce phénomène au départ d'une fusée, mais les conséquences seraient considérables, car l'envoi des fusées dans l'espace est grevé par le poids au décollage et ce serait un immense progrès si l'on pouvait le diminuer.

Mais le grand domaine de recherche est le nucléaire qui repose depuis 70 ans sur le réacteur à uranium inventé par **Joliot, Halban et Kowarsky** en 1938 ! Au lieu de refuser le nucléaire en raison des déchets, de l'environnement, et des radiations, on ferait mieux de chercher à le dépasser. C'est ce que je tente de faire, et je ne suis pas le premier.

Un tel dépassement a été tenté dans plusieurs pays, particulièrement en France grâce à **Georges Vendryès, avec les réacteurs à neutrons rapides.** En 1957 j'ai entendu Francis Perrin, le Haut Commissaire au CEA[9] à l'Energie Atomique, en parler avec enthousiasme comme d'un grand projet[10] du CEA qui donna naissance à Super Phénix. Hélas, après des années de fonctionnement, le projet fut abandonné devant des difficultés réelles, inhérentes à tout grand projet, mais surtout sous la pression des médias en raison d'un accident, réel lui aussi. L'opinion s'en est émue en croyant à un accident nucléaire, alors que ce n'était qu'un incident dans le système de refroidissement, qui n'était pas nucléaire mais chimique et donc beaucoup plus bénin.

Une confusion analogue s'était produite aux Etats Unis après l'accident de « Three Mile Islands » qui n'a fait ni dégâts ni victimes. Mais cela a suffi pour donner un coup de frein au nucléaire américain. Les esprits sont décidément très aiguisés dans ce domaine !...

Je veux faire ici une remarque : j'ai 83 ans, j'ai connu le temps où les voitures sentaient l'essence et émettaient des nuages noirs de fumée qui n'effrayaient personne : c'était normal et on admirait le progrès. Les usines émettaient des nuages bien pires et on ne protestait pas. J'ai connu une dame qui est morte du tétanos attrapé dans son jardin, et mes grands parents ont connu le temps où on pouvait l'attraper dans les villes. Enfant, je me suis baigné dans des rivières où l'on risquait la poliomyélite (une plaie des campagnes). Etant étudiant, au moins dix de mes camarades avaient eu des « primo-infections », euphémisme de la tuberculose, et j'ai encore des amis qui n'en sont pas remis. J'ai connu le « fog » de Londres et le brouillard de Lyon et de Milan. Et j'en passe. Je ne veux pas du retour à ce passé.

Mais tout cela est largement révolu car la science est passée par là. Et qu'on ne me parle pas de la pollution actuelle de Paris qui n'est rien à côté de celle du passé. Curieusement, plus la pollution baisse, plus on en parle mais personne ne se passe de la voiture ni de l'avion, tout en cultivant des idéologies de décroissance ! Pour revenir à ma petite liste, ajoutons que les lacs alpestres du Léman et d'Annecy sont redevenus propres, on se baigne à nouveau dans la Seine à Paris et les poissons sont revenus. **La vérité, c'est que le développement de la société et de l'industrie a ses maux mais le développement finit par l'emporter et par guérir les maux qu'il a créés.** A l'heure ou j'écris ces lignes, Pékin crève sous le brouillard et la poussière, car son développement est insuffisant : qu'on le laisse faire (je le souhaite à la Chine !) et ce ne sera qu'un mauvais souvenir. Faisons l'honneur aux Chinois et à d'autres, de penser qu'ils ne sont pas plus bêtes que nous. Et eux, au moins, croient au progrès, car ils en ont besoin et ils le cherchent.

---

[9] Commissariat à l'Energie Atomique.

[10] Les réacteurs habituels, à neutrons lents, utilisent l'isotope 235 de l'uranium, qui constitue 0,7% de l'uranium naturel. Le reste est perdu dans les « déchets ». Les réacteurs à neutrons rapides utilisent l'isotope 238 qui constitue presque tout le reste, soit près de 100 fois plus !

Alors revenons au nucléaire. Il crée des déchets, c'est vrai, mais les ingénieurs du CEA ne sont pas des irresponsables : ils prennent toutes les précautions possibles pour enfouir profondément les déchets dans des terrains adéquats et pour les retraiter, c. à d. pour les réemployer dans la mesure du possible : la France est même en pointe dans ce domaine et l'étranger lui fait appel. Signalons enfin que les réacteurs à neutrons rapides auraient brûlé beaucoup de déchets. Dommage !

Il n'est donc pas question, à mon avis, d'abandonner l'énergie nucléaire après les services que nous lui devons : une large part de la prospérité de la France depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Un homme politique anglais a eu ce mot churchillien : « La France n'a pas de charbon, la France n'a pas de pétrole, la France n'a pas le choix »… et elle a créé l'une des meilleures industries nucléaires au monde. Il fut un temps où nous en étions fiers et où le slogan populaire était : « La France n'a pas de pétrole mais elle a des idées ». Il faut ajouter qu'il n'y a jamais eu d'accident nucléaire grave en France. Et nous avons en ce domaine d'excellentes équipes de médecins, car après tout, qui sait ? La vie est dangereuse, même si elle l'est moins qu'au temps des cavernes.

Mais revenons à la question : peut-on aller plus loin que Joliot et ses collaborateurs ?

Nous avons déjà un élément de réponse avec les réacteurs à neutrons rapides dont j'espère bien que l'idée reviendra à l'actualité. Mais on peut demander mieux : **peut-on éliminer de l'industrie nucléaire les éléments lourds radioactifs, en se tournant vers l'énergie de fusion d'éléments chimiques légers qui produirait une énergie plus grande sans laisser de déchets ?** C'est une vieille idée qui date du temps de Joliot mais qu'on n'a jamais su encore mener à bien.

Je vais reproduire, à ce sujet, une partie d'un article récent que j'ai écrit :

I Introduction.

L'un des problèmes actuels les plus difficiles de la physique appliquée est l'exploitation industrielle de l'énergie de fusion nucléaire. La solution proposée jusqu'ici a été de rapprocher fortement des particules lourdes électriquement chargées (protons, deutons, etc), l'interaction forte ayant une portée très inférieure à celle de la barrière coulombienne ; d'où l'idée de porter un plasma à une haute température pour conférer aux particules une impulsion suffisante pour franchir cette barrière. Mais cette solution, n'a guère réussi car elle se heurtait à deux obstacles.

- Le premier obstacle, qui a été franchi, était l'impossibilité de trouver des matériaux d'enceinte capables de contenir un plasma chauffé à des millions de degrés. La réponse brillante, due à deux physiciens russes : Tamm et Sakharov, fut le **tokamak** qui enferme le plasma dans une enceinte dont il ne touche pas les bords, en faisant tourner les particules autour d'un champ magnétique intense.
- Mais un obstacle plus grave est que, la fusion étant difficile à obtenir et surtout à maintenir, il fallut augmenter la température du plasma. Et le tokamak devint instable. Bien que la Russie soit abondamment pourvue en spécialistes de la stabilité du mouvement, ceux-ci ne vinrent pas à bout du problème et le projet fut abandonné. D'où le sujet du présent article : peut-on faire autrement ?

À mon avis **il faut tenter d'abandonner les hautes températures**. L'idée que je propose n'est pas vraiment une catalyse, mais elle y ressemble. Elle consiste à essayer d'influer, grâce à des interactions faibles, sur les interactions fortes, sources de l'énergie de fusion. En effet, l'astrophysique contemporaine a montré que les interactions faibles commandent, dans une certaine mesure, les interactions fortes responsables de l'énergie des étoiles. Selon un mot frappant, celles-ci s'éteindraient si on arrêtait les interactions faibles. Mais le problème est évidemment de savoir comment on peut « se servir » des interactions faibles.

On peut se guider pour cela sur la première expérience qui a prouvé en 1953 l'existence du neutrino, longtemps après la fameuse prévision de Pauli. L'expérience était basée sur le fait qu'on savait que les neutrons libres étaient nombreux dans un réacteur nucléaire et qu'ils subissaient des désintégrations bêta, lesquelles devaient émettre, si Pauli avait raison, des anti-neutrinos :

$$n \rightarrow p + e^{-} + \tilde{\nu} \quad \left(p \ ou \ {}^{1}H \ représentent \ un \ proton\right)$$

Ces anti-neutrinos, à supposer qu'ils existassent, devaient être nombreux au voisinage d'un réacteur, siège de la désintégration des neutrons libres. Donc (mais ce « donc » est génial), on pouvait espérer que si l'un d'eux tombait sur un proton, celui-ci reviendrait à un état neutron par une « désintégration bêta inverse » :

$p + \tilde{\nu} \rightarrow n + e^{+}$, où e^{+} est un positron.

Et c'est vrai[11] : donc le neutrino existe ! Mais la probabilité de la réaction est faible, d'où la difficulté de l'expérience. Nous nous inspirerons de ce raisonnement, mais rappelons auparavant les réactions qui entretiennent l'énergie des étoiles. On en connaît deux :

1) **La réaction proton – proton** (dont nous ne donnons que les deux premiers termes) part d'une réaction entre deux protons, qui crée un deuton, un positron et un neutrino :

$$p + p \rightarrow {}^{2}D + e^{+} + \nu$$
$${}^{2}D + p \rightarrow {}^{3}He + \gamma \ ... etc$$

2) **Le cycle carbone – azote – oxygène, de Bethe-Weizsäcker**, qui s'écrit **:**

1. ${}^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$
2. ${}^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^{+} + \nu$
3. ${}^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$
4. ${}^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma$
5. ${}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^{+} + \nu$
6. ${}^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He$

C'est bien un cycle car le carbone ${}^{12}C$ revient, d'où le nom de « cycle du carbone ». Notons un point important : les réactions citées, comme celles que nous avons omises, se produisent dans les étoiles et sont reproductibles en laboratoire. Mais avec une différence qui attire l'attention : **elles exigent une température notablement plus haute en laboratoire que dans les étoiles**. On est alors en droit de se poser la question : Y a-t-il dans la nature des conditions, par exemple d'ordre catalytique, qui nous échappent ? C'est cette remarque qui m'a guidé, à tort ou à raison, dans la présente tentative. Ajoutons encore quelques précisions :

a) Les deux séries de réactions sont des réactions de fusion nucléaire produites par des *interactions fortes* ; l'une et l'autre aboutissent à l'hélium : c'est évident pour la seconde, mais c'est vrai aussi pour la première que je n'ai pas donnée en entier.

[11] Citons une anecdote. Les auteurs de l'expérience, Reines et Cowan, télégraphièrent victorieusement à Pauli : *« Le neutrino existe »*. La réponse fut sobre : *« Je le savais »*, signé Wolfgang Pauli.

b) En outre, les deux séries commencent, ou sont coupées, par des *interactions faibles,* évidemment avec émission d'un neutrino.

II L'idée proposée.

La présence de neutrinos émis lors des réactions qui entretiennent l'énergie des étoiles, ainsi que l'analogie avec la désintégration bêta-inverse dans la mise en évidence du neutrino, suggèrent l'idée que, si l'on pouvait envoyer un flot d'anti-neutrinos sur les éléments de la production d'énergie, on pourrait espérer accélérer cette dernière, car l'absorption d'un antineutrino est équivalente à l'émission d'un neutrino. Qui sait si quelque chose de semblable ne se produit pas dans les étoiles ?

Mais même si c'est vrai, nous ne pouvons pas le créer sur terre car nous ne savons pas contrôler un faisceau de neutrinos. En revanche, nous possédons un moyen de contourner la difficulté : les monopôles magnétiques leptoniques, dont nous avons déjà parlé.

Rappelons qu'un monopôle leptonique est *un neutrino excité*, doué de deux types d'interaction :

1) Il possède une *charge magnétique (nord ou sud)*.
2) Il est capable d'*interaction faible* comme le neutrino. Le monopôle sud correspond au neutrino et le monopôle nord à l'antineutrino. On voit que dans **la réaction proton – proton,** on peut agir sur le départ du cycle, et dans **le cycle du carbone**, on peut agir sur deux réactions.

A l'inverse du neutrino, le monopôle est manœuvrable car sa charge magnétique obéit aux lois de l'électromagnétisme. Signalons qu'un *accélérateur de monopôles* a été inventé par Bergher et Lochak, et que Bergher est en train de l'installer avec Fargue et Karatchentzeff. Nous comptons créer des faisceaux de monopôles qui permettraient d'accélérer les réactions citées plus haut.

Une idée simple est d'introduire dans un tokamak un faisceau de monopôles nord produits par notre accélérateur. Ce sera une intervention de particules porteuses d'interactions faibles, manœuvrables de main d'homme et capables de transformer des désintégrations bêta en désintégrations bêta-inverses.

$$p + p \rightarrow {}^2D + e^+ + \nu \quad \Rightarrow \quad p + p + \tilde{\nu} \rightarrow {}^2D + e^+$$

On pourrait ainsi accélérer un cycle de réactions sans recourir aux températures élevées. Il faut ajouter à cela que les résultats obtenus sur le monopôle magnétique ont coûté quelques dizaines de milliers d'Euros en matériel à la Fondation Louis de Broglie, avec un personnel bénévole, et quelques centaines de milliers d'Euros à EADS pour les locaux prêtés[12].

Sans me lancer dans les dithyrambes au sujet d'EADS, je dirai simplement que j'y vois l'exemple d'une société industrielle gigantesque et mondialement connue où l'on trouve le temps d'écouter et d'aider les promoteurs d'idées nouvelles qui nécessitent encore de longues années de recherches avant qu'EADS et les auteurs en profitent.

Ce n'est pas la science financière et sociologique d'aujourd'hui, dont le progrès scientifique se mesure aux sommes engagées et au nombre d'emplois créés pour construire des tours de Babel modernes. Merci à EADS ! En toute simplicité.

Juste un mot au sujet des recherches géantes sur la fusion. Les constructeurs du premier tokamak sont de mes amis (dont Urutskoiev) et je connaissais bien l'un des inventeurs, Igor Tamm, lauréat du Prix Nobel. Je sais combien les physiciens russes ont été consternés de découvrir les instabilités du

[12] Des amis russes m'ont dit en riant que ce sont des sommes très insuffisantes pour que nos idées soient crédibles aux yeux de la science actuelle.

tokamak (ce tokamak géant qu'on laisse, la mort dans l'âme, sous la poussière à l'Institut Kurchatov, non pas faute d'entretien mais par abandon réaliste[13] : **c'est pourquoi je suis sceptique sur ITER,** comme bien d'autres physiciens). **La principale raison de mon rêve** au sujet de mon idée sur la fusion est mon espoir d'offrir à mes amis russes la remise en marche de leur génial appareil.

Quelques mots encore sur les applications du monopôle :

- En premier lieu **le magnétisme** auquel s'ouvre un vaste champ, maintenant qu'on sait créer les **pôles** qu'imaginait Maxwell et les **courants** magnétiques qu'imaginait Pierre Curie.
- La **magnéto-électronique** inaugurée par Poincaré et Dirac : l'interaction entre les deux sortes de pôles. L'équation montre que leur produit est quantifié et comme (jusqu'à présent) l'électricité se conserve, les monopôles ne se conservent pas dans ces interactions : on peut les créer et les détruire.
- **L'action biologique des monopôles**, inaugurée par Pryakhine, Urutskoiev et Ivoïlov. Cette action est remarquable sur les micro-organismes.

A propos des Tours de Babel de la science moderne

- Rappelons que **Louis de Broglie** était l'initiateur du CERN (c'est un peu oublié).
- Et que **Werner Heisenberg** était le Président de l'Institut Max Planck.

Et ils se sont fait tous deux silencieusement exclure :
- De Broglie parce qu'il ne suivait pas les dictats de la science à la mode, c'est connu.
- Et Heisenberg aussi, c'est moins connu. Heisenberg était un dieu de la science du XX° siècle car c'était la plus brillante étoile de l'Ecole de Copenhague. Mais à la fin de sa vie, dans les années cinquante (j'ai vécu cet épisode), il eut une idée « catastrophique » : une théorie des particules qui n'était pas dans la ligne. Songez : elle était non linéaire ! Et le bruit a commencé à se répandre que tout compte fait il n'était peut-être pas un aussi grand physicien qu'on l'avait cru.

Mais il a fait « pire » : quand on a lancé le projet du grand synchrotron du CERN, il ne l'a pas soutenu, simplement parce qu'il existait aux Etats Unis et en Russie des grands accélérateurs dont les capacités étaient loin d'être épuisées, et qu'il ne voyait pas l'urgence d'un troisième. Il a même dit que les futurs constructeurs feraient mieux de s'asseoir et de réfléchir : ils trouveraient davantage de résultats. En quoi il était naïf (si je puis me permettre) car il voyait le monde à son image !

On savait tout cela à l'Institut Henri Poincaré où je travaillais. Mais c'est mon ami Harald Stumpf, ancien élève d'Heisenberg qui me l'a rappelé récemment. Son patron comme le mien était coupable de crime de lèse-majesté contre la science moderne.

Louis de Broglie m'a dit un jour, d'un ton pensif : « Je pense que de nos jours je n'aurais rien fait » et il ajouta, après un silence : « Et peut-être Einstein non plus ». Une autre fois, il m'a dit être sans illusion – lui, l'initiateur du CERN ! – au sujet de la science de masse, car la création humaine, qu'elle soit littéraire, artistique ou scientifique est toujours solitaire.

Ce sera ma vraie conclusion.

[13] Toutefois, d'autres tokamaks existent en Russie.