

Solution de l'énigme quantique

Premier compte rendu : rappel et extension du cadre de mathématiques quantiques et des principes de son application

A. AVRAMESCO,

a.avramesco@wanadoo.fr

A la mémoire de Monsieur le Professeur **Jean Bass**,
ancien élève de l'École Polytechnique
enseignant et chercheur au niveau d'une haute tradition mathématique
auteur de la théorie des fonctions pseudo-aléatoires

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 suffiraient 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 de Lorentz, de Planck et surtout d'Einstein se sont heurtées à l'incompréhension de savants éminents. Ils en ont triomphé, 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'appesantissent sur la recherche et sur l'enseignement 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 originaux 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

RESUME. En utilisant et en développant le cadre de mathématiques quantiques déjà publié par l'auteur, on montre dans quelle mesure l'équation de Schrödinger réalise une première approximation du passage au cadre continu classique, ce qui permet de proposer une solution scientifique à l'énigme quantique. On prépare également l'extension du présent compte rendu pour une description cohérente de divers phénomènes quantiques.

ABSTRACT : By the use and development of quantum mathematics already published by the author, the Schrödinger equation is shown to realize a first approximation of the transition to the continuous conventional frame. In this way, it is possible to put forward a scientific solution to the quantum enigma. An extension of the present account is also prepared, in view of a consistent description of various quantum phenomena.

Il serait sans doute de bonne tactique de parler directement de physique, au lieu de rappeler d'abord que toute science véritable comporte des exigences de nature incomparablement plus proprement humaine, philosophique et englobante que des logiques superficielles et mal mathématisées. Mais les gens de savoir sont, un peu inévitablement, de piètres tacticiens en affaires soumises aux influences politiques. De Socrate à Einstein, en passant par au moins Ibn Rushd et Galilée pour ne citer que quelques-uns des plus immenses — et sans parler des conditions dans lesquelles ont été arrachées à Louis de Broglie ses responsabilités administratives à l'académie des sciences —, ils se sont contentés de renvoyer leurs persécuteurs à l'éclat de rire et au mépris des siècles.

Suivant le raccourci extraordinaire d'Einstein pour la mort de Marie Curie :

Les qualités morales des personnalités marquantes sont peut-être, pour une génération et pour le cours de l'histoire, d'une plus grande importance que les accomplissements purement intellectuels ; même ceux-ci dépendent, à un plus haut degré qu'on ne le croit généralement, de la grandeur du caractère.

Et de même :

*Nul ne peut se consacrer à la science pour des raisons autres que superficielles — comme le sont l'ambition, l'argent ou le plaisir du sport cérébral — et négliger ces questions : quels sont les buts de la science, jusqu'à quel point ses résultats généraux sont-ils vrais, qu'est-ce qui est essentiel et qu'est-ce qui est fondé sur des traits accidentels de son développement ? (in « E. Mach », *Physikalische Zeitschrift*, 17, p. 101, 1916, cité par M. Born in *Albert Einstein, philosopher-scientist*).*

*Le souci de l'homme même et de sa destinée doit toujours constituer l'intérêt principal de toutes les tentatives techniques... N'oubliez jamais cela au milieu de vos diagrammes et de vos équations (in R. S. Lynd, *Knowledge, for what ?* Princeton 1939 p. 114, aussi cité dans l'ouvrage ci-dessus p. 649).*

C'est un devoir absolu de le rappeler ; mais l'adversité contemporaine ("moderne") est telle qu'il faut, pour ne pas effaroucher de bons esprits, parfois faire hélas comme si l'on pouvait jamais séparer science et philosophie ; donc, tout en écartant des pléonasmes comme physique réaliste ou physique scientifique, on se contentera ici pour terme-repère de physique de la constante de Planck (non réduite) : *Ph*.

Sur ce thème, tous les cinq ans environ depuis la fin des années 1910, on entend proclamer que l'on tient enfin la solution « définitive et rationnelle » de l'énigme quantique. Ce n'est donc rien que lieu commun que le titre du présent article. Quant à son rapport avec le contenu, ce sera aux lecteurs d'en juger, et cela fait sans doute peu de monde dans les expériences passées et circonstances présentes dont on vient de rappeler de grands traits : s'il pouvait en être autrement, le monde et l'histoire ne seraient pas tels qu'ils se perpétuent sous nos yeux. C'est aussi pour cela que, plus que jamais, les progressistes doivent reconnaître pour seule majorité humaine celle qui porte un nom aussi exaltant que peu lisible dans l'actualité : l'avenir.

C'est encore pour ces causes qu'on rencontre la difficulté principale de communication du présent travail : il faut en peu de pages aider le lecteur à rejoindre un itinéraire bibliographique, et surtout d'orientation, étalé sur quelque quarante années. Car en tout ce temps, seuls ont pu passer, à travers les mailles des filets tendus contre la liberté de pensée, de rarissimes jalons — publications acceptées par des revues certes relativement libérales au sens vrai du terme, mais de ce fait même fort peu répandues et fort peu accessibles.

Ce qui suit a été rédigé en toute conscience de ce grave problème, particulièrement aigu après (et encore dans) un siècle de totalitarismes. On doit donc recommander vivement au lecteur d'avoir à disposition au moins les textes [1] et [2], aisément accessibles sur Internet, et qu'on va d'abord s'efforcer de résumer et déjà prolonger un peu.

Ainsi qu'il se doit en affaires de fondements scientifiques, les idées et concepts de base sont d'une parfaite simplicité : il suffit de revenir à la prise de conscience historique de l'évolution de la physique, puis insérer cette évolution à son tour dans le champ de la méthode expérimentale. Par exemple, il est de plus en plus clair après Einstein que la notion d'évènement est beaucoup plus physique et essentielle que celle de *point matériel*, de même que la notion de quantum ne peut prendre de sens que dans un bain, un milieu très réel de signaux et autres quanta, et non dans une totalisation idéelle d'*espace et temps*. Alors, et en admettant bien entendu que toute définition suppose approximation, les réalités d'abord décrites même au niveau microscopique par des termes de choc, absorption ou émission, aussi bien que diffusion et diffraction, doivent être en fait analysées en évènements (ou suite d'évènements, c'est-à-dire qu'une représentation de plus en plus fine décompose ce qui a été d'abord englobé en un seul élément). En particulier, la plupart des difficultés de lecture pourraient provenir du point suivant : **la**

tendance naturelle après des siècles de pensée en termes continus est de chercher à faire varier arbitrairement les intervalles entre évènements ; or seules ont un sens des coïncidences d'évènements, quantifiés en périodes caractéristiques sur des programmes différents, ce qui revient à intégrer le caractère purement quantique et non continu des représentations : il faut des **mathématiques quantiques**, « discrètes », non continues. On aura largement à y revenir, mais une simple intégrale comme

$$S = \int mc.ds = mc^2 \int d\tau \text{ (et non le classique } S = - \int mc.ds)$$

n'a pas de sens général sur autre chose que des multiples de période propre, donc ne peut valoir a priori que des multiples de h (comme dans les débuts de la théorie quantique).

Le premier modèle naturel de l'univers est alors un **graphe orienté acyclique** en incessant déroulement (dont la frange ou frontière est le "présent", cf. infra) : chaque sommet représente un évènement, et chaque arête un lien direct (orienté, donc) entre deux évènements. On verra ci-dessous les difficultés d'abord considérables d'un tel modèle même simplifié, car il va à l'encontre de toutes les *statiques* dont les géométries acquises ont imprégné les esprits. Pour le moment, on doit insister encore sur deux points, largement abordés dans les références indiquées ci-dessus :

- il n'est plus question, dans le cadre propre à ces idées, de parler d'un comportement décrit par des *équations aux dérivées partielles*, mais par ce qu'on a déjà appelé ci-dessus programme, à savoir : comment étendre la représentation des évènements déjà réalisés, constituée par un ensemble de points et traits donnés, par de nouveaux points et traits significatifs de nouveaux phénomènes — on précisera régulièrement cette notion tout au long du travail — ; c'est seulement pour rassurer le lecteur qu'on commencera par la reconstitution des descriptions habituelles, en *équations de comportement*
- de façon très satisfaisante, la vision de flux quantique incessant redonne comme approximations les variables et fonctions associées spatio-temporelles avec toutes leurs propriétés :
 - depuis la plus élémentaire (la quasi-continuité : car les rapports, entre par exemple temporalités concernant seulement quelques quanta, sont des rationnels quelconques, et donc de différences de mesure aussi petites qu'on le veut, au contraire des références par exemple à des échelles spatio-temporelles de Planck)
 - jusqu'à la plus délicate (sans doute la notion de présent).

Pour commencer sur ces bases la mathématisation, il convient d'abord de préciser la traduction au niveau de 1-simplexe (graphe) :

- chaque sommet (ou « point ») du graphe correspond à un évènement physique – chaque flèche (ou « arête orientée ») entre deux évènements a et b donne une paire ordonnée (a, b) ou lien direct entre ces deux évènements — les liens indirects [ainsi (a, b), (b, c) relie indirectement a et c] seront examinés plus loin ;

la raison du caractère acyclique est bien sûr qu'un évènement ne peut dépendre de lui-même ; la transcription des notions de cônes du *passé* et du *futur* donne les ensembles d'évènements classés par l'orientation des paires existantes comme respectivement *antérieures* et *postérieures*.

Il suit déjà de là que :

- l'irréversibilité est au fond des choses, conformément à l'expérience universelle et contrairement aux tentatives plus ou moins désespérées de réversibilité ou microréversibilité, problème réglé par Galilée voici tantôt quatre siècles [3]
- la causalité, conforme elle aussi au développement universel des disciplines scientifiques, n'est ni choix ni invention, mais départ obligé de tout affinement de compréhension.

Ensuite, de façon déjà un peu plus générale, l'espace naturel de plongement d'un n-simplexe est d'abord décrit par \mathbb{R}^{2n+1} . Donc l'*apparence* initialement tridimensionnelle de l'espace tient à deux sortes d'approximations :

- les nouveaux évènements dépendraient *seulement* des évènements antérieurs (cône du passé ci-dessus) — cette première approximation voile la dépendance à des relations antérieures, puis à des relations entre relations, etc., ce qui donnerait un 2- puis n-simplexe
- la restitution d'un *présent* (ensemble d'évènements considérés comme à peu près *simultanés*, mais situés en fait sur des sous-graphes de programmes distincts) revient à attribuer une ligne (ou tache) de dimension(s) pratiquement négligeable(s) suivant une coupe *artificielle*, dite à temps constant.

Ce dernier point est à *la source des inévitables indéterminations spatio-temporelles*, et donc évidemment d'une importance particulière. On ne peut que le souligner rapidement ici : car les notions de quanta et sous-programmes ne seront mieux définies qu'après quelques développements, et en assouplissant nettement les structures élémentaires déjà proposées [1] [2].

En particulier dans la mesure où, à coupe de temps (artificiel) fixé, les taches-images d'un sous-programme sont de dimensions négligeables, elles redonnent des sortes de sommets dans un schéma voisin d'un graphe, mais cette fois non orienté, les arêtes étant une sorte de projection des relations voisines. On parlera alors abrégativement de (quasi-)graphe instantané, résumant pour le temps choisi le graphe orienté universel (ce temps approché est lui-même évidemment relatif au quantum ou sous-programme dont on

suit l'histoire, conformément à la conception du groupe de Lorentz-Einstein comme conséquence du caractère quantique de l'univers [1] [2]).

Dès ce stade, on commence à mesurer les considérables « avantages épistémologiques » de la nouvelle physique, qui ne fait que se mouler sur l'expérience la mieux reconnue, et l'histoire dans son élan au plus long terme. Pour pratiquer encore le langage einsteinien, non seulement cette physique se rouvre à un déterminisme en rejetant espace et temps dans l'« Olympe de l'*a priori* », mais elle répond immédiatement à des exigences comme la flèche d'ordre des choses et les diverses possibilités de dimensions spatiales. Que l'on songe au contraire aux formalismes paradoxaux qui prétendent *partir* d'« états », notion intrinsèquement contradictoire, pour *ensuite* restituer l'orientation évidente, le déroulement incessant du réel, et la fugacité de la notion de présent. Ou mieux encore peut-être, que l'on compare, aux quelques lignes ci-dessus sur les *dimensions* d'espace associées à divers niveaux d'approximations,

- soit les fixations sur le nombre 3 dont n'existe, et pour cause, guère de justification proprement spatio-temporelle,
- soit des remises en cause rendues illisibles par le manque de logique mathématique en affaires de physique dite, assez étrangement, des « particules » élémentaires.

Reste, pour commencer les calculs, à mettre des nombres dans le graphe universel (celui où se regroupent tous les sous-graphes ou sous-programmes partiels, tous les quanta). Le groupe de Lorentz-Einstein naît (cf. toujours [1][2]) des conditions hautement physiques de coïncidence entre séquences d'évènements quantiques (période temporelle impliquant période spatiale de par l'invariance de c) et de la conception de chaque séquence comme « complexe de lumière » comme disait Einstein (« complexe de signaux » serait plus adapté à de futures généralisations).

Car on sait depuis longtemps le lien entre l'intégrale du lagrangien et la notion physiquement la plus universelle. Dès Hamilton puis le *Treatise on natural philosophy* de Thomson et Tait, c'est l'action (au sens physique mathématique) qui est au coeur de tout : or il existe pour elle un quantum absolument omniprésent depuis un bon siècle. C'est ce quantum, la constante de Planck (et surtout pas la constante « réduite ») qui est l'unité initiale des relations entre évènements, l'intervalle de base « 0 ou 1 » auquel songeait déjà Eddington [1], et qui **donne la valeur d'une arête**.

Le second pas quantitatif consiste à prendre en compte qu'au niveau fondamental et de façon particulièrement simple, chaque flèche entre évènements (ou relation directe = paire orientée, ou quantum de base) crée autant d'espace que de temps *relatifs* : car chaque flèche est partie d'un complexe

de signaux, et a donc pour image géométrisée une croissance de temps et d'espace dans un rapport naturellement pris égal à 1 dans le repère propre — même s'il est indispensable de noter ce rapport c pour bien marquer qu'il s'agit de décomptes différents dans un même sous-programme de points et traits [1][2] —. Ce sous-programme est immédiatement soumis à deux contraintes :

- d'abord un temps propre, qu'à des coefficients entiers simples près on doit identifier au temps de Compton

$$h/(m_0 c^2) = h/h\nu_0 = \tau_0 = \lambda_0/c \quad (1)$$

avec λ_0 longueur de Compton $h/m_0 c$ [1] [2]

- ensuite, s'il s'agit du cas unidimensionnel d'une particule ayant **une masse** au repos, un équilibre donnant toujours autant de flèches dites ascendantes (ou vers les x positifs ou "vers la droite") que descendantes (ou vers les x négatifs ou "vers la gauche") dans la représentation obligée de l'ordonnée x en fonction du temps-abscisse t (représentation seule à même d'éviter, par exemple, une pente infinie pour la vitesse nulle) [1] [2].

En outre, et c'est là la clef des développements subséquents de la théorie, le graphe universel (au stade toujours provisoire où il est rendu de son développement) est **connexe**, en ce sens que si l'on s'autorise aussi bien à suivre qu'à remonter le sens des flèches (le "cours du temps"), alors tout événement déjà réalisé est lié à tout autre : **mais le sous-graphe lié à un sous-programme, ce qu'on appelait jusqu'ici une particule avec son "onde" accompagnatrice, ce sous-graphe, lui, n'est pas connexe**. Les diverses arêtes qui le composent doivent seulement respecter des corrélations (d'Einstein) : à savoir, en cas de masse au repos non nulle donc de repère naturel associé, un nombre égal d'arêtes des divers types (deux types pour une dimension : vers x positifs et vers x négatifs) dans l'unité de temps propre. Seules les **confluences** de divers sous-programmes, de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que se réalisent divers événements nouveaux, permettent de peu à peu fixer toutes les variables pour un passé assez lointain (quoiqu'en général extrêmement récent aux échelles du jour terrestre). C'est cet assouplissement capital qui achève de permettre les calculs et de saisir le principe positif de **confluence et détermination** derrière les indéterminations spatio-temporelles [4] : on verra ci-dessous comment le simple fait d'attacher une fonction à **une** onde-particule, en fait **un** quantum ou sous-programme quantique et graphique, oblige à **renoncer** à une large part de prévision.

Pour éclairer en peu de mots le lecteur (faute encore de pouvoir le renvoyer à une publication complète), voici l'idée à partir de laquelle la démonstration s'opère assez simplement, même en détail. S'agissant d'une "particule" à une dimension (axe des ordonnées Ox) douée d'énergie de repos ou masse, il y a donc pour chaque période propre autant de flèches 1) "vers la droite" ou "ascendantes" que 2) "vers la gauche" ou "descendantes" (au contraire évidemment, par rapport à l'axe des abscisses Ot , toutes les flèches vont vers les t positifs). Si l'on pouvait se permettre de décomposer indépendamment en ces deux catégories le sous-programme d'arêtes correspondant à cette "particule", on pourrait calculer par exemple un choc d'après deux effets Compton, puisqu'une suite d'arêtes de même nature est un pur signal (particule sans masse propre et donc sans repère propre, cf. toujours les deux premières références). Un peu de réflexion, ou quelques lignes de calcul, montrent que, alors qu'énergie et impulsion demeurent de toutes façons conservées, l'ordre de ces deux effets Compton intervient et donne deux résultats totalement différents de ce qui est universellement admis pour le choc.

Il s'ensuit que, malgré sa non-connexité, *on ne peut décomposer indépendamment* en ses deux catégories de flèches un quantum doué de masse au repos : cette **non-séparabilité** des deux types d'arêtes est à la source de tous les aspects "ondulatoires" et autres aspects globaux des faits quantiques — des fentes d'Young aux **corrélations d'Einstein** (intérieures au cône-futur de l'évènement-source) pour en situer en deux points la longue histoire —.

1 Première synthèse : énergie, masse, interaction

Dans la ligne qui vient d'être définie, la notion de masse et surtout de substance n'a donc d'intérêt que dans les approximations historiquement inévitables qui ont prélué à la découverte des quanta. Ce qu'on peut appeler — presque indifféremment pour éviter la répétition du même terme central — un sous-programme, un quantum ou quanton ou un corpuscule-onde, est en résumé un **rythme sans lieu** (rythme fixé par le temps de Compton τ_0 et l'allure d'une période, cf. ci-dessous), et si la masse est non nulle il y a **rela-tion** et **non-séparabilité** entre les différents éléments du sous-programme de façon que, sur une période, il y ait (à une dimension pour commencer) autant de flèches vers les x positifs que négatifs. Dès que le sous-programme a quelque complexité, le rapport de la période au temps de Compton prend des valeurs de plus en plus grandes, ainsi que le montrent très simplement quelques exemples : mais il serait purement et simplement antiscientifique de proposer sans préliminaire ces images. Car, toujours pour faciliter l'accès au renouvellement de la pensée contre la censure actuelle, il devient inévitable de simplifier à l'extrême. On le fera mais en rappelant d'abord, contre

l'inculture des modernistes, l'intérêt du siècle le plus extraordinaire de l'histoire de la physique, de la thèse d'habilitation de Riemann (1854) au testament scientifique d'Einstein (1954)¹ [1]. A partir de là, pour la présentation de *Ph* (physique au niveau de Planck donc), certains traditionnalistes se sont avérés parfois très novateurs, tels Tomonaga [5] puis Feynman [6]. Le premier est farouchement réaliste mais — comme longtemps son maître à penser Louis de Broglie — il cherche à se raccorder presque toujours à la référence spatiale. Le second est plus hésitant, mais sa façon de dégager les lignes de force des calculs en *Ph* est incontestablement admirable.

Il a donc fallu choisir pour les représentations ci-après d'opposer seulement la tradition novatrice dans ce qu'elle a de meilleur, et la mise en forme à partir de Mathématiques quantiques déjà proposée [1][2] : d'où les abréviations de *Pht* et *PMh*.

Le fondement côté *Pht* est, en somme, sans représentation. Le statut même du ψ ou du vecteur d'état continue d'être l'objet de disputes. Faute d'un accord, sans doute impossible, entre les gens qui manipulent de façon plus ou moins cohérente les mathématiques associées, on doit donc faire retour aux notions contradictoires (mais constamment en arrière-plan) de point matériel et d'onde (fig. 1)², entre lesquelles continuent d'osciller les comptes rendus aussi bien théoriques qu'expérimentaux.

Côté *PMh*, le fondement est la représentation du **rythme sans lieu**, d'allure de sous-programme variable. Peut-être le sous-programme le plus proche des habitudes acquises est-il le quantum primitivement rendu par le graphe connexe de la figure 2 et correspondant à deux fois deux flèches-arêtes constituant la période T_0 dans le temps propre : T_0 inclut donc quatre flèches (ou quatre h), et le temps de Compton vaut

$$\tau_0 = T_0/4,$$

et la longueur de Compton $c \tau_0 = \lambda_0$, avec toujours $h v_0 = h/\tau_0 = m_0 c^2$. Mais tout de suite, il faut déconnecter (rendre **sans lieu**) ce **rythme** quintessentiel. Pour commencer, il est agréable de s'en tenir à une vitesse moyenne nulle et à une valuation en x/c symétrique (figure 3) : alors l'accrochage des arêtes possibles se fait aussi de façon symétrique en coordonnée spatiale, ce qui donne des allures où $OA = OA'$ et pareillement $OB = OB'$, traduction simple

¹ C'est dans cet extraordinaire testament, comme on y a déjà longuement insisté [1], qu'Einstein déclare le plus nettement l'« incompatibilité » du continu et du quantique.

² Toutes les illustrations sont regrouppées en fin de rédaction.

des **corrélations d'Einstein** ou de l'aspect ondulatoire. Mais il doit demeurer entendu que tout cela n'est vrai, et aussi élémentaire, que dans le repère propre puis les hypothèses de symétrie : on verra des éléments successifs de généralisation plus loin ; notamment, l'hypothèse de vitesse moyenne nulle n'implique pas à elle seule une symétrie. Ce qui est valable dans tous les cas, c'est un pas naturel obligé, un quantum, aussi bien en temps qu'en distance, et bien sûr les corrélations d'Einstein (dans un cône).

Il est ainsi clair que le sous-programme est bien libre pourvu qu'il respecte son rythme, en ce qu'il est connecté aux autres sous-programmes seulement par un champ de fréquences moyennes (probabilités de Poincaré) très variable en fonction du passé (son propre passé, mais aussi celui du graphe universel). Autrement dit, la figure 3 à bande de temps fixée (pour une période propre, et donc hors temps continu) est acceptable, à condition

- d'abord de toujours se représenter que le déroulement perpétuel du graphe universel (le cours du "temps") rend la notion de présent plus que relative d'une part, et d'autre part que les diverses flèches à (bande de) temps propre donné(e) sont affectées de valuations, puis de fréquences moyennes d'accrochage, aussi variables qu'on le veut — sous la seule réserve, évidente, que la somme des probabilités redonne 1 tant qu'il y a conservation du sous-programme (allure et période constantes, c'est-à-dire conservation du type de particule, donc en général mécanique quasi-galiléenne et rapport Doppler proche de 1)
- ensuite que la vitesse moyenne n'a aucune raison d'être nulle ailleurs que dans le repère propre ; simplement, plus le repère extérieur comporte de sous-programmes en relation régulière entre eux, plus le maillage par ce repère extérieur sera fin, plus les rapports Doppler relatifs seront variés, en restant toujours rationnels mais de plus en plus denses (on renvoie une fois de plus aux références [1][2])
- enfin que, toujours pour les cas de relativité quasi-galiléenne (de loin les plus commodes à envisager d'abord), le rapport de la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_{\text{de B}}$ à celle de Compton est, en termes de rapport χ de Doppler,

$$2\chi/(1-\chi^2),$$

donc très élevé (en gros c/v puisque $\chi \approx 1 - v/c$) ; cela donne à penser que la variation de valuation est faible d'une flèche à une flèche immédiatement voisine, connexe sur la figure 3 (flèches a priori acceptables, donc représentées seulement en pointillés en attendant de nouveaux déroulements) : en effet le pas naturel en ordonnée spatiale x/c est de l'ordre de la longueur de Compton — tout cela sans préjuger pour le moment du rapport entre valua-

tion et probabilité, qu'on explicitera sans mal après avoir déduit les opérateurs liés aux grandeurs habituelles au lieu d'opérer des parachutages devenus simplement coutumiers.

Comme il s'agit là du pivot pour toute la suite, il est nécessaire d'y insister par quelques compléments :

- sans doute le point le plus important est-il dans le lissage vers le continu que permet le passage, par intervention des variables de Compton, aux valeurs brogliennes ; on verra bientôt comment, curieusement, c'est plutôt la longueur d'onde de de Broglie qui est renvoyée à la représentation, alors que l'intuition broglienne demeure presque intacte : on ne peut restituer les aspects ondulatoires qu'en supposant le quantum répandu, inégalement certes, mais très largement dans son espace

Un point d'histoire est inévitable à ce propos : au moment de la thèse soutenue par L. de Broglie (*Recherches sur la théorie des quanta*), les corrélations d'Einstein naissaient à peine, et encore, bien timidement sous les critiques remarquables d'Ehrenfest ; mais elles étaient bien là, notamment dans les justement célèbres études sur le gaz parfait monoatomique, publiées par Einstein de 1923 à 1925, avant les mises en forme successives du Conseil Solvay de 1927 puis la publication Einstein-Podolsky-Rosen de 1935

- on s'est placé pour commencer dans le repère propre, pour éviter d'inutiles complications de figures ; c'est accessoire ; l'essentiel est que le sous-graphe d'accrochages possibles doit être vu comme s'étendant "très loin", plus précisément : à l'intérieur des parallèles respectivement issues
 - vers le haut et parallèlement à la demi-droite $x/c = t$, du dernier sommet acceptable en x positifs d'après la dernière confluence de programmes réalisée et
 - vers le bas et parallèlement à la demi-droite $x/c = -t$, du dernier sommet acceptable en x négatifs dans les mêmes conditions

en tout : une sorte de demi-cône du futur mais partant d'un segment et non d'un point

- il est raisonnable (en général) de situer le point O dans le repère propre à hauteur d'une série horizontale de sommets du sous-programme (puisque le sous-graphe est périodique) ; car au niveau des flèches, traductions de simples couples orientés, le trait utile à la géométrisation n'a pas (en général) de signification
- dès qu'on sort de l'hypothèse de vitesse moyenne nulle pour aller à des vitesses positives, si le sous-graphe de base était celui de la figure 2, il deviendra un rectangle dont les grands côtés restent parallèles à la "première bissectrice" (pente en unités naturelles $c = 1$) mais sont $1/\chi$ fois plus longs que ceux du carré oblique initial, tandis que les petits côtés

sont parallèles à la “seconde bissectrice” et χ fois plus petits (pente $c = -1$, cf.[1][2]), conformément à la figure 4 (cf. [1][2]) ; cela redonne bien la vitesse réduite

$$w = v/c = (1/\chi - \chi) / (1/\chi + \chi) = (1 - \chi^2) / (1 + \chi^2)$$

comme pente w de la diagonale marquée

- rien n’oblige à s’en tenir à une allure de programme aussi élémentaire ; des formes telles que celles de la figure 5 sont admissibles, tout antisymétriques qu’elles soient ; mais il serait prématuré de tenter dès ici un classement des types de quanta en fonction de critères de symétrie ou antisymétrie (ou, ce qui revient au même, d’un décalage de phase).

Dans les conditions ainsi décrites, la conservation de l’énergie est une tautologie : une fois choisi un repère, le nombre de flèches qu’on peut considérer comme intermédiaires entre deux évènements définit la durée — le “temps” total pour tous ces intermédiaires, en fait simplement le nombre de fois h — tandis que la valeur relative du temps de Compton d’un sous-programme permet de lui attribuer sa part de ce nombre. Ensuite, la somme de toutes les parts redonne évidemment la totalité, la même durée.

Lorsqu’il peut y avoir **jonction** (on revient presque immédiatement sur ce terme) entre deux ou plusieurs sous-programmes (coïncidence possible entre deux sommets, d’abord flous ainsi qu’expliqué dans l’introduction — cf. [1][2], où il était déjà bien précisé qu’il était nécessaire de considérer des coïncidences comme d’abord possibles mais non encore réalisées, en ce sens virtuelles), puis si cette interaction est confirmée par la suite du déroulement, on dira que les sous-programmes eux-mêmes deviennent non-séparables : c’est ce qui est traduit jusqu’ici par le terme peu adapté de « réduction du paquet d’ondes », voire par des termes scientifiquement absolument inacceptables autour de prétendues “mesures”.

On cache aujourd’hui autant que faire se peut, sous des sourires entendus, l’irréalisme intolérable de l’inquisition de Copenhague, devenue gênante même pour les accapareurs de progrès technique : mais rien n’effacera dans l’histoire la censure qui en est résultée dans les revues à prétention scientifique. La « décohérence » revient enfin, elle, à des processus physiques, et elle correspond à des expériences d’une grande finesse : mais elle est trop souvent saisie comme porte de sortie inespérée par des gens qui ont, des décennies durant, soutenu la parapsychologie bohro-wignérienne, et qui cherchent maintenant à dissimuler leur retournement obligé. Ce n’est pas ainsi qu’on règlera le problème laissé par le vocabulaire égaré de la “mesure”, et par deux ou trois générations

de guerre contre Einstein³ et les acquis les plus fermes de la méthode expérimentale depuis Galilée.

Cette réalité de non-séparabilité peut être décrite par divers termes : celui d'*interaction* présente l'inconvénient d'être associé déjà dans la littérature à « forte », « électromagnétique », « faible » etc. ; *union* a le défaut de ne pas souligner le caractère provisoire, de même que *fusion* (aussi déjà utilisé dans d'autres domaines), et *confluence*. On proposera donc ici de parler simplement de **jonction**, à quoi s'associe naturellement **dijonction** pour définir le phénomène de détachement toujours possible, et de loin le plus fréquent, après la jonction.

En résumé, dans un repère autre que celui propre au quantum que l'on suit,

| | <i>Pht</i> | <i>PMh</i> |
|---|---|--|
| Représentation de base | onde ou corpuscule (contradictoire) | graphe orienté acyclique un sommet = un évènement une arête vaut <i>h</i> |
| Appareil mathématique | Tout est ramené à un "état" $\psi(t, x)$ - non observable - transformé au gré des besoins par Fourier alors que $p \rightarrow \infty$ est ultrarelativiste | Les pavés élémentaires, disposés de façon complexe autour d'un axe fictif $t = 0$, montrent que seule peut avoir un sens <u>approximatif</u> une fonction de <u>bande</u> , $\psi(t \pm \Delta t, x/c)$ où Δt est de l'ordre du temps de Compton et où x/c a aussi un pas naturel ($\ll \lambda_{de B}$) (fig. 6) |
| Lien entre physique et mathématique ($t = 2i\pi$) | Utilisation constante de $\exp(tS/h)$ sans justification | Non seulement la périodicité rend obligatoire l'usage de $\exp(tS/h)$, mais on voit immédiatement que les grandes valeurs de $ x/c $ correspondent aux influences d'un passé, ou sur un futur, <u>fort lointains</u> |
| Cohérence | Equation de Schrödinger non justifiée, et de conditions d'utilisation imprécises | Equation de Schrödinger justifiée de façon détaillée (cf. infra) et de domaine d'application précisé. Les phénomènes physiques = naturels se déroulent sans intervention ou formalisation anthropomorphistes |

On rappelle que les figures sont placées en fin de rédaction.

³ Einstein étant mort depuis plus d'un demi-siècle, et les circonstances et opportunités changeant, "on" reconnaît plus aisément aujourd'hui qu'il n'a jamais cessé d'être génial, en physique quantique comme partout. Il sera intéressant de suivre ce que devient ce tournant dans les "majorités" et agrégations officielles à venir.

2 Deuxième synthèse : introduction à la mécanique ondulatoire (quantum libre à une dimension)

Quoique les théories du cadre continu se réclament fréquemment de l'épithète quantique, il est bien clair qu'elles ne cessent de se référer à l'idée initiale ondulatoire de de Broglie, ensuite mise en forme par Schrödinger puis, avec plus ou moins d'honnêteté, par pratiquement tous les esprits même les plus remarquables, comme Dirac, Heisenberg, l'insurpassable Tomonaga [5] et Feynman [6] — Einstein étant presque seul à tenter de voir plus loin qu'une « théorie continue » [1] (cf. encore note 1 ci-dessus).

Une notation des plus malheureuses porte aussi sa part dans l'égarment de la physique, quoique certes à un bien moindre degré que l'horreur de la "mesure". On a vu plus haut le caractère illogique de prétendues théories qui prennent pour repère espace et temps, constatent que ni position ni impulsion ne peuvent exister dans la nature ni sans contradiction avec les principes affichés (ni la mesure de Dirac ni une composante de Fourier ne sont de carré intégrable), et perpétuent cependant un continuisme envers et contre toute expérience et des marées successives d'incohérences, notamment divergences d'intégrales. Un peu semblablement, il faut ici faire une bonne fois un sort à la notation en « constante de Planck réduite ».

Une périodicité, même partielle comme on verra, se traduit naturellement en affaires quantiques par des termes de Fourier complexes, d'abord en $2\pi i/h$, ne serait-ce que pour $\exp(2\pi i v_0 t_0)$, plus généralement $\exp[(2\pi i/h)(Et - px)]$ suivant les notations brogliennes et les explications fournies dans les textes précédents [2]. A cet égard, le choix du *temps et non de l'espace* comme première variable tient à l'ordre physique de construction de ces notions : en mathématiques quantiques, il faut d'abord penser au graphe en déroulement et ensuite seulement à la reconstitution d'une simultanéité, donc d'abord au temps et ensuite à l'espace, ce qui est particulièrement apparent dans la forme périodique en temps propre $\exp(2\pi i v_0 t_0)$, où la variable d'espace ne figure même pas — cette priorité absolue du temps donne, dans ce qui suit et notamment pour l'équation de Schrödinger, certains signes opposés à de malheureuses habitudes, que le lecteur corrigera aisément —. En outre, la comparaison des pavés élémentaires de sous-programmes et l'analyse harmonique fine de telles représentations conduisent à des termes certes voisins des développements habituels de Fourier, mais où le caractère discret conduit à considérer des éléments périodiques en racines n-èmes de l'unité, n étant un entier positif quelconque, en général "grand" (il faut revenir aux superpositions de mailles par coïncidence [1][2] en décomposant les côtés en nombres entiers n de parties égales, après quoi

la périodicité approximative reproduit des mailles identiques : d'où cette intervention des racines n -èmes de l'unité). D'un côté, cela revient certes à considérer en bloc $2\pi/h$ pour abrégé de façon générale l'écriture ; mais de l'autre côté cela voile fort regrettamment que *le terme 2π est un artifice mathématique au même titre que i* , alors que h demeure le fait physique et l'unité naturelle. Il est donc très souhaitable de considérer plutôt une abréviation de $2\pi i$, et l'on proposera ici (comme déjà dans le tableau ci-dessus comparant Ph et PMh)

$$\mathbf{1}$$

(iota gras, accessible aisément en de nombreux traitements de textes), quitte à rétablir l'explicitation au moment des calculs (ce qui est de toutes façons nécessaire), par exemple pour les changements de variable. On constatera d'ailleurs rapidement que cette notation plus physique évite souvent, et de manière utile, la remultiplication de la constante de Planck par le « 2π du diable, toujours prêt à ressortir d'un côté quand on l'élimine de l'autre », comme disait L. Schwartz justement à propos des transformées de Fourier.

Pour restituer la périodicité et les termes de Fourier qui lui sont attachés, la traduction naturelle en repère propre est donc $\exp(\mathbf{1} t/\tau_0)$. Simplement, c'est seulement le cône du futur de chaque sommet acceptable qui est pavé des diverses positions possibles du sous-programme — ce cône est limité, à une dimension, par les parallèles aux deux bissectrices des axes issues du sommet en cause, *si* on a déjà géométrisé le sous-graphe : ce qui est aussi *naturel* pour se rapporter aux habitudes qu'*inutile* en termes de topologie discrète —. Au lieu de répéter chaque fois l'expression complète de l'exponentielle, on peut alors se contenter de relire dans un autre repère (suivant les formules de Lorentz) le coefficient de l'exposant après $\mathbf{1}$, tel par exemple qu'on l'a déjà analysé [1] [2]. Comme il s'agit de se raccorder au cadre spatio-temporel, et en se souvenant que la forme (obligatoirement positive en tant que décompte de nombre de flèches et donc de h) de l'action donne un **maximum** (et non un minimum) dans l'écriture obligatoire en termes quantiques [1], il est simple de voir

- d'une part que ce maximum est effectivement réalisé pour un sous-programme libre (quantum provisoirement isolé) lorsque le rapport Doppler correspond à la vitesse réduite w exactement égale à la pente de ligne droite joignant le point, choisi pour origine, au point $(t, x/c)$ dans les axes associés, soit

$$w = x/ct \quad (2)$$

d'autre part que si $E_0 = h\nu_0$ est l'énergie de repère propre ou "de repos" du sous-programme (toujours nombre de quanta d'action par unité de temps), il est commode de se servir des notations abrégatives et très physiques de

$$\text{fréquence einsteinienne } \nu = E/h \quad (3)$$

$$\text{et fréquence broglieenne } b = pc/h \quad (4)$$

avec $\nu^2 - b^2 = \nu_0^2$.

On a alors (cf. toujours [1][2]) :

$$\begin{aligned} (Et - pc \cdot x/c)/h &= (t - w \cdot x/c) / [\tau_0 \sqrt{(1 - w^2)}] = t(1 - w^2) / [\tau_0 \sqrt{(1 - w^2)}] \\ \text{ou encore } (t/\tau_0) \cdot \sqrt{(1 - w^2)} &\approx (t/\tau_0) (1 - x^2/2 c^2 t^2) \end{aligned} \quad (5)$$

suivant le développement limité probablement le plus pratiqué dans le passage de la relativité einsteinienne à l'approximation galiléenne. En fait, le développement à partir de l'avant-dernière expression suffit : il faut seulement revenir à de Broglie et à sa thèse, particulièrement sa « fascination » concernant la dualité entre

$$\tau_0 / \sqrt{(1 - w^2)} \text{ et } \tau_0 \cdot \sqrt{(1 - w^2)} \dots$$

Les *deux lignes* d'équation (5) — la première quelque peu explétive donc — correspondent à *deux pages* d'affirmations et propositions de calculs de l'ouvrage de Feynman et Hibbs [6], dans des conditions qui méritent quelque examen pour situer la présente recherche dans ce qui est généralement pratiqué aujourd'hui en affaires de physique.

Feynman (avec Hibbs, mais il s'agit très largement d'une reproduction et extension du travail de Feynman paru en 1948 dans les *Reviews of modern physics*)

- est passé complètement à côté de la quantification du cadre mathématique lui-même (au passage : les diagrammes de Feynman ne sont pas des graphes, car dans les graphes, par définition, toutes les arêtes ont la même nature)
- n'a jamais fait le rapprochement entre la signification d'une arête et la constante h (non réduite) de Planck, rapprochement qui est à la base des périodicités et par là du « ubiquitous i »
- ne tient aucun compte des corrélations d'Einstein
- s'est laissé aller à considérer des particules de masse finie à la célérité de la lumière (cf. notamment la page 35, où en unités réduites la masse est prise égale à 1, donc ne laisse aucune place au doute sur l'attribution à

cette masse d'une énergie infinie, dans le cadre relativiste que les auteurs cherchent à approcher)

- superpose des itinéraires à vitesses inacceptables (éventuellement infinies dans le cas galiléen) au lieu de séparer des champs d'arêtes équiprobables à l'intérieur d'un sous-programme (et donc de cônes-signaux), comme il a été longuement expliqué plus haut (cf. figures) : alors qu'il ne peut y avoir que des parts de sous-programmes, non-séparables mais de position indéterminée, en l'absence de nouvelles jonctions

A ce propos, le remarquable ouvrage de Johnson et Lapidus [7], entre plusieurs conclusions d'une rare honnêteté scientifique (et il en faut pour avouer l'échec partiel d'un travail de cette ampleur), reconnaît au moins la très grande difficulté, et sans doute l'impossibilité, de donner un sens aux « intégrales de chemin » dont Feynman lui-même n'a cessé de ressentir les insuffisances ; celles-ci sont encore cernées par exemple par un travail d'Aharonov et Vardi de 1980 (Physical Review D, vol. 21, n° 8, p. 2235 seqq.) qui montre comment la matérialisation d'un chemin de Feynman suppose un jet *continu, d'énergie infinie, réduit à une ligne sans épaisseur*.

Il y a peut-être un petit intérêt historique à marquer encore ceci : Feynman renvoie d'abord une innocente intégrale de Fresnel (p. 49) à « mathematical complexity », surtout parce qu'il s'en tient à la représentation en parties réelle et imaginaire : or cette séparation voile le fond de la question, alors que l'hélice où font bloc modules et arguments est très favorable à l'éclaircissement.

Après ces critiques — pourtant bien évidentes — et quand on a eu le malheur de constater de communs réflexes de médisance, on est obligé de situer le présent texte pour ce qui est de **sa dette à l'égard de Feynman**. C'est très simple : quoiqu'à un niveau probablement inférieur à l'incroyable culture et au sentiment profond de l'enracinement historique qui sont l'apanage de Tomonaga, Feynman est l'un des plus grands pédagogues de l'intuition de la physique quantique après Einstein, de Broglie et Schrödinger, et il est clair que le présent travail n'existerait pas sans cet ensemble d'esprits. On se demande ce que l'intelligence d'un Feynman eût donné sous la direction de maîtres comme celui auquel est dédié l'article ici rédigé, au lieu de ceux qui ont toujours fait retour à ce que « no elementary quantum phenomenon is a phenomenon until it is a registered (observed) phenomenon », ou « what is the good of a universe without anybody to look at it ? »... Ce « principe anthropique » a très matériellement inhibé les élans de compréhension de nombreux physiciens *made in USA* et ailleurs. Si l'on a admis qu'il soit publié dans des revues scientifiques, au nom de quoi refuserait-on — et refuse-t-on — qu'il y soit contré ?

Ceci posé quelle est, dans le champ de probabilités des arêtes du sous-programme (donc à l'intérieur de son cône du futur), l'influence d'un point de coordonnées (0, 0), sur le point de coordonnées réduites (t, x/c), lorsque le sous-programme se développe ? Puisque la transmission se fait à partir d'une période $\tau_0 \cdot \sqrt{1-w^2}$, w vitesse réduite comme il a été montré ci-dessus, le passage au continu périodique est décrit par

$$\exp [\mathbf{t} (t/\tau_0) (1 - x^2/2 c^2 t^2)] \quad (6)$$

suivant l'approximation finale de l'équation (5). A t fixé, le terme (t/τ₀) correspond simplement à la fréquence propre (énergie de repos divisée par h en langage spatio-temporel). Or on sait depuis longtemps que, pour la cohérence de l'approximation galiléenne, il faut se contenter de l'enveloppe galiléenne ψ_g de solutions ψ_e plus complètes et einsteiniennes, par exemple pour l'approximation qui permet le passage des formes de Klein-Gordon à celles de Schrödinger :

$$\Psi_e = \exp(\mathbf{t} t/\tau_0) \Psi_g, \quad \text{donc réciproquement} \quad \Psi_g = \exp(-\mathbf{t} t/\tau_0) \Psi_e \quad (7)$$

(là encore et toujours : diverses notes antérieures de l'auteur ont explicité ce passage nécessaire, et montré qu'il dépend du caractère régulier de ψ_g et non pas d'approximations physiquement absurdes sur les valeurs relatives de c et h, puisque celles-ci valent 1 en unités naturelles ; rien de tout cela n'a pu être publié).

Reste donc à examiner la part de facteur de transmission proprement dit

$$\exp [\mathbf{t} (t/\tau_0) (-x^2/2 c^2 t^2)] = \exp [-\mathbf{t} x^2/(2c^2 t \tau_0)] \quad (8)$$

Comme la somme ou intégrale approchée de toutes les contributions doit finalement être normée à 1, il suffit de partir de l'intégrale de Fresnel de -∞ à +∞ de

$$\exp(-i r^2) dr$$

qui vaut [8]

$$\sqrt{\pi} \cdot \exp(-i \pi / 4)$$

(ce dernier terme est plus correct que la notation en 1/√i qu'utilise Feynman). Dès lors, même un bourbakiste doit être capable d'effectuer le changement de variables

$$r^2 = \pi x^2 / (c^2 t \tau_0)$$

et donc de trouver que l'intégrale de $-\infty$ à $+\infty$ de $\exp[-\mathbf{t} x^2/(2c^2 t \tau_0)]$ vaut

$$c \sqrt{t \tau_0} \cdot \exp(-i \pi / 4)$$

qui est homogène à une longueur en raison du terme dx de l'intégration.

Avant de poursuivre, plusieurs points du calcul ci-dessus méritent analyse.

D'abord, l'intégrale de Fresnel est incomplète : le cône du futur ne va pas

$$\text{de } -\infty \text{ à } +\infty$$

mais

$$\text{de } -ct \text{ à } +ct.$$

Si x est négligeable vis-à-vis de ct , cela changera d'autant moins les choses que le coefficient de transmission avant intégration (en incluant soigneusement donc le facteur $1/[c\sqrt{t \tau_0}]$ indispensable pour normer à 1) est de toutes façons solution de l'équation de Schrödinger, et qu'une intégrale n'est jamais qu'une superposition linéaire. Toutefois ce n'est pas une intégrale de Riemann (même non généralisée) à quoi l'on a affaire au plus près de la réalité, mais une somme sur les sommets intermédiaires d'un sous-graphe virtuel qui s'étend peu à peu dans un cône-lumière. Comme l'intervalle entre deux sommets, en ordonnée x/c , est à considérer comme petit par rapport à t , c'est à la définition même de l'intégrale de Riemann que l'on revient, et il y a fort à parier que l'approximation est rapidement acceptable. On y revient ci-dessous.

Ensuite et c'est beaucoup plus grave, il est absolument inacceptable sur le plan physique de faire

$$t \rightarrow 0.$$

Car le sous-graphe-“particule” n'existe pas pour des valeurs inférieures au temps de lecture dans le repère, $\tau_0/\sqrt{1-w^2}$: si on place un sommet plus rapproché que cette durée quantifiée, cela signifie qu'il y a un apport d'énergie *supérieur à l'énergie de repos*, donc que le quantum en cause a toutes les chances de se transformer « en chaleur et lumière » ou tout autre type de sous-graphe, en tout cas dans des conditions où l'approximation galiléenne est impuissante à restituer les phénomènes.

Ces précautions vitales étant prises, rien n'interdit de jouer avec des mathématiques et de reconnaître que, puisque

$$e^{i\pi/4} / (c\sqrt{t\tau_0}) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-i\pi x^2 / (c^2 \tau_0 t)\right) dx = 1$$

on a affaire à l'une des innombrables approximations en convergence vague (ici donc en gaussienne imaginaire) de la mesure de Dirac pour $t \rightarrow 0$, et donc on a le moyen de décrire par convolution la solution de l'équation unidimensionnelle de Schrödinger pour n'importe quelle condition initiale. Il est remarquable que cette solution soit l'équivalent très exact de la solution homologue pour l'équation de la chaleur, et corresponde à l'approximation de *diffusion instantanée*, alors que le type d'équation *n'est pas parabolique* au sens strict du terme (le coefficient de la dérivée partielle temporelle est imaginaire pur). Pour reprendre encore les paroles de Louis de Broglie : « si l'on jette un morceau de sucre au Havre, l'océan serait *aussitôt* légèrement sucré à New-York », ce qui cerne bien les limites de l'approximation galiléenne. En outre, il ne faut pas oublier que l'élément d'intégration est inverse d'une longueur (quand on y inclut, bien entendu encore une fois, le coefficient devant le signe d'intégration) et donc qu'il ne s'agit pas encore d'un ψ , mais seulement d'une *densité linéaire* de ψ . C'est seulement après intégration que ce terme, diversement qualifié suivant les vocabulaires (noyau, propagateur...), donnera le nombre complexe pur qui décrit par exemple en fonction de l'abscisse t le *raccourci en simultanéité* du sous-programme.

Enfin, on demande au lecteur d'excuser une remarque que peut-être il faudrait lui laisser : la fidélité extrême à l'intuition broglienne a fait que les éléments ci-dessus ne laissent aucune place aux opérateurs, et une place des plus limitées aux représentations de Fourier proprement dites. En fait, il n'est difficile *par ailleurs* ni de montrer comment se fait par exemple l'intervention de l'opérateur d'impulsion, ni de saisir la signification en densité de $|\psi|^2$: il suffit de revenir aux calculs d'invariants de Schrödinger lui-même dans ses *Mémoires sur la mécanique ondulatoire* ou aux remarquables comptes rendus de Tomonaga, ici très simples (à une dimension les intégrales d'Ostrogradski se ramènent à l'intégration par parties la plus élémentaire). Mais surtout, il faut s'extirper des séparations en parties réelle et imaginaire au profit des représentations en pas de vis ou d'hélice (ou en tire-bouchon) : ce pas apparent est bien entendu la longueur de de Broglie, alors que celle de Compton est seulement l'incrément quantique naturel dont le lissage reproduit ensuite, comme pour l'intégrale ci-dessus, les approches continues. On rappelle que les références de base [1][2] fournissent en particulier les expressions en rapports Doppler toujours plus physiques que les raccords approximatifs en *vitesse*, terme en quelque sorte doublement spatio-

temporel (quotient de *distance* par *temps*) et donc d'autant plus éloigné des quanta. Un prochain compte rendu explicitera tout cela.

3 En vue du prochain compte rendu

Comme on l'a annoncé ci-dessus, c'est une chance pour le continu que l'élément d'intégrale (du facteur de transmission lissé) soit solution de l'équation de Schrödinger, que l'on se rapproche ou non de termes à temps très petit. Il n'en demeure pas moins que le pas véritable des intégrations (de Riemann, puis au sens des distributions) est incompressible et correspond à un changement radical de sous-programme si on cherche à passer au-dessous. Il est donc faux aussi que deux **jonctions** très (trop) voisines donnent des résultats semblables, en particulier en affaires de position. Il n'y a pas plus de quatrième « incertitude » qu'il n'y a de vérité dans les « dévergondages intellectuels » (Langevin) tirés de la triple incompatibilité entre variables spatio-temporelles de présent et d'évolution : c'est simplement que, **si** les conditions extérieures (et non une "mesure") imposent un apport, une **jonction** d'une violence suffisante pour donner sens à une fréquence plus grande que celle propre au sous-programme (c'est-à-dire caractérisant celui-ci comme provisoirement indépendant des autres), alors le mélange, la **jonction** des sous-programmes ainsi rendus non-séparables donne des choses qui n'ont plus grand rapport avec les invariants relatifs suivis jusque-là.

Un des stigmates de l'obsession spatio-temporelle est d'ailleurs rendu avec une simplicité particulière dans les équations ci-dessus : c'est qu'en somme (même s'il y a de la part de l'auteur quelque amusement à mettre en forme les mathématiques pour que ce soit plus évident encore) *la constante de Planck ne figure ni dans l'équation de Schrödinger ni dans les expressions qui y mènent* : malgré le caractère de relativité non-einsteinienne, c'est la célérité de la lumière qui est seule inévitable — et, certes, le τ_0 : on peut donc refuser cet argument en revenant à $\tau_0 = h/h\nu_0$ et $h\nu_0 = m_0 c^2$, et se prévaloir du terme de masse au lieu d'accepter la physique et la quantification toute naturelle en termes de graphes ; mais la masse est simplement à ranger au musée des matérialismes primaires attachés à la catégorie de substance. Il y a fort à parier que cet anthropomorphisme subsistera avec l'aide et le soutien de tous ceux dont Einstein disait : « la première condition pour être un membre irréprochable d'un troupeau de moutons, c'est d'être soi-même un mouton ». Toutefois, la référence de la physique est l'univers, loin au delà des métagalaxies plus ou moins naïves que nous livrent d'abord nos sens — comme la référence humaine est l'avenir —. Quels que soient les batailles et

les dogmatismes, la meilleure approximation de la réalité d'une époque, ou comme on peut dire la vérité, finit toujours par triompher.

Il résulte essentiellement de tout cela que l'équation de Schrödinger est fausse dès que l'on passe à des durées où l'intégration ne peut plus approcher la somme des moyennes sur diverses arêtes du cône-signaux. Le travail qu'on achève ici fournit donc un second moyen, peut-être peu utilisable à court terme, de redémontrer l'éternelle évidence, que les lois de la nature sont bien loin d'être fixées dans des techniques « pour épiciers et ingénieurs », comme écrivait Einstein à Schrödinger. Le premier moyen était dans le principe d'expérimentation formulé voici plus de vingt ans [4]. Le second est sans doute aussi très délicat de mise en oeuvre, mais plus remarquable : c'est de tenter de voir comment se fait l'évolution réelle des probabilités pour des durées de l'ordre des quanta de temps propre à un sous-programme — en termes physiques, donc en termes d'évènements et de graphes associés.

Références

[1] A. Avramesco, *Le groupe de Lorentz-Einstein comme conséquence d'un quantum d'action*.

La version la plus fidèle aux intentions de l'auteur figure encore sur le site du *Centre de Communication Scientifique Directe*, ccsd.cnrs.fr. Une parution presque complète a pu se faire aux *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, vol. 28, n° 2, 2003.

[2] A. Avramesco, *Quantum mathematics for Quantum Physics, First Example et Second Example*, sur le site hal.archives-ouvertes.fr/hal.00000325/en/. Cette version anglaise reprend pour l'essentiel [1], mais supprime les références historiques et va plus loin dans l'interprétation purement physique.

[3] Galilée, *Dialogue des grands systèmes*, Première Journée (la réplique en cause est mise dans la bouche de Sagredo et se retrouve notamment p. 165 dans la traduction chez Hermann, Paris 1966, dans le volume sur *Galilée, Dialogues et Lettres choisies*) :

« *Ceux qui exaltent tant l'incorruptibilité, l'inaltérabilité, etc.* » (la réversibilité étant dans cet etc.) « *ne font, je crois, que céder à leur désir de se tirer d'affaire le plus longtemps possible et à la terreur que leur inspire la mort ; ils ne s'avisent même pas que si les humains étaient immortels, leur tour ne serait pas venu de naître au monde ; ils mériteraient de rencontrer une tête de Méduse qui les changerait en statue de jaspe ou de diamant pour les rendre plus parfaits qu'ils ne sont* ». On n'imagine plus aujourd'hui le courage à tous niveaux qu'il a fallu au suprême fondateur de la méthode expérimentale pour écrire ces lignes, encore aggravées par la réponse de Salviati-Galilée : « *Pareille métamorphose ne serait peut-être pas sans quelque avantage pour*

eux, car il vaut mieux, je crois, ne pas raisonner du tout que de raisonner à contre-sens ». Rarissimes encore aujourd'hui sont ceux qui savent que le troisième homme des Dialogues, Simplicio, « vaillant champion et mainteneur de l'aristotélisme », était pour les contemporains une caricature évidente du pape, qui avait publié sous le pseudonyme de Simplicissimus... Et à propos du Titan italien, on nous matraque avec des histoires de géocentrisme et de Copernic !

[4] A. Avramescio, *Sur l'utilisation du principe de Heisenberg pour lever certaines indéterminations quantiques* in *Fundamenta scientiae* 8, 1987, n°1 (l'auteur n'est pas responsable de divers aspects de la présentation). L'idée était déjà dans le *Symposium écrit de la Fondation Ferdinand Gonseth*, probablement inaccessible.

[5] Sin-Itiro Tomonaga, *Quantum Mechanics*, vol. 1 1962, vol. 2 1966, North-Holland Publishing Company, Amsterdam.

Ouvrage de très grand savant, où non seulement il est question de physique, ce qui est rare dans les ouvrages dits de mécanique quantique, essentiellement consacrés à des formalismes, mais où tout naturellement chaque découverte est restituée dans son histoire, avec un souci incessant de pédagogie. A ce jour encore, du moins à ma connaissance, aucun travail n'approche sur les sujets en cause la netteté et la portée de l'achèvement de Tomonaga.

[6] R. P. Feynman & A. R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals*, Mc Graw Hill, New York 1965.

On trouve dans les *Feynman Lectures on Physics*, tome III, les lignes suivantes (p.16-12 dans l'édition anglaise 1966 d'Addison-Wesley) sur l'équation de Schrödinger :

« *Where dit it come from ? Nowhere. It's not possible to derive it from anything you know. It came out of the mind of Schrödinger, invented in his struggle to find an understanding of the experimental observations of the real world* ».

Suit une allusion au début du chapitre (p. 16-4) où l'équation « aux amplitudes » est déjà écrite, et où Feynman spécifie : « *We do not intend to have you think we have derived the Schrödinger equation but only wish to show you one way of thinking about it* ». Le calcul de l'équation dont il s'agit est basé sur le cas d'un cristal, et après divers parachutages aussi peu justifiés que le $\exp(iS/\hbar)$ du livre avec Hibbs.

Tout cela constitue un ensemble de preuves que d'un côté Feynman n'a jamais songé à creuser la quantification par période propre d'un sous-programme en mathématiques quantiques, et de l'autre côté qu'il est resté tout à fait scientifiquement insatisfait de ses intégrales de chemin. Certes, on peut d'abord songer que son cours au California Institute est légèrement antérieur au livre avec Hibbs : mais d'une part le mémoire initial est de 1948, et d'autre part on trouvera dans la préface de Lapidus (réf. ci-dessous), datée de 2000, la preuve

que jusqu'à sa mort en 1988 Feynman n'a cessé d'être tiraillé entre l'espoir d'une justification mathématique de sa mise en forme et son déplaisir de la voir inacceptable. Einstein est un autre exemple, plus éclatant encore, de ces savants mécontents de leur oeuvre, peut-être justement à cause de leur notoriété auprès de gens qui voulaient bien admirer, mais non approfondir.

[7] G. W. Johnson and M. L. Lapidus, *The Feynman integrals and Feynman's Operational Calculus*, Oxford University Press, 2000.

[8] J. Bass, *Cours de Mathématiques*, tome 1, fascicule 2, cinquième édition, Masson, Paris 1978 — p. 334.

(Manuscrit reçu le 10 mai 2007)

Illustrations

Les flèches n'ont pas été indiquées sur tout ou partie des figures 3 et 6 : elles vont toujours vers les t positifs.

La figure 3 devrait être prolongée (en traits pointillés) « loin » vers le haut et le bas, comme expliqué dans le texte. Il a semblé inutile de répéter davantage le motif central (carré oblique issu de O).



Fig. 1
Images (contradictoires) de corpuscule et d'onde

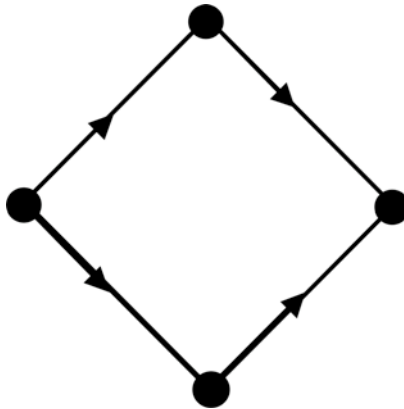
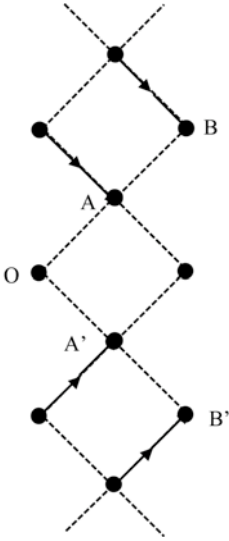
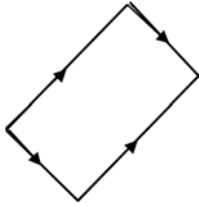


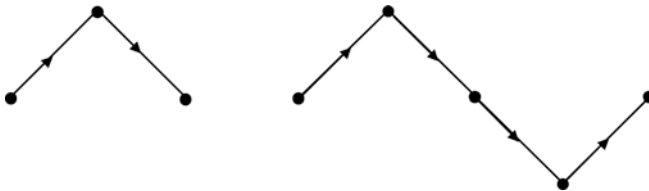
Fig. 2
Représentation, d'abord connexe, d'un sous-programme simple

**Fig.3**

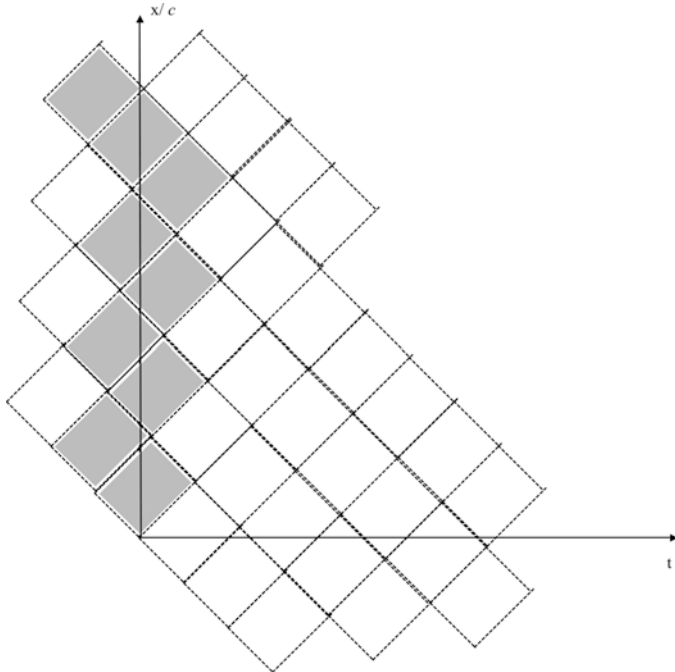
le même sous-programme, à période fixée, déconnecté ; dans les hypothèses les plus simples, seules des arêtes symétriques (trait plein) se réaliseront lors de nouvelles jonctions-connexions

**Fig. 4**

Géométrisation de l'élément de sous-programme de la fig. 2, dans un repère où la vitesse est positive (le rapport χ est, pour la clarté, choisi beaucoup trop petit)

**Fig. 5**

Deux autres allures d'éléments de sous-programmes

**Fig. 6**

Les pavés élémentaires en repère non propre chevauchent l'axe $t = 0$ de façon complexe, ce chevauchement s'effectue dans les zones grisées : cela n'a donc pas de sens rigoureux de parler d'une fonction d'onde à temps rigoureusement fixé.

L'origine est centre de symétrie de la figure, qui se poursuit « loin » (cf l'introduction aux illustrations) dans toutes directions.