

L'origine de toutes choses est le Logos

La physique quantique sur la voie vers une réalité non-spatiale

Martin Wigand

Dans nos livres d'école nous lisons que tout est édifié d'atomes qui consistent à leur tour en « particules élémentaires » encore plus petites. Les illustrations à ce sujet suggèrent que les atomes seraient des billes matérielles — et cette représentation vit plus ou moins consciemment dans l'image que l'être humain moderne se fait du monde dans l'ensemble. Dans cette image, il n'y a guère d'espace pour une réalité spirituelle. Pourtant les résultats expérimentaux de la physique quantique ont contraint les physiciens dans ces dernières décennies à repenser de fond en comble notre concept actuel de matière ainsi que la nature de l'espace et du temps. La présente contribution tente d'exposer un aperçu de cette évolution.

À la fin du 19^{ème} siècle encore, on se représentait des atomes comme de petites billes ou boulettes qui étaient reliées les unes aux autres par de petits crochets et anneaux. Rudolf Steiner, à l'âge de 21 ans, se tourna contre une telle représentation primitive de l'atome — comme quelques physiciens à la pointe de leur époque, par exemple Ernst Mach — dans son essai *Seule critique possible des concepts atomistiques*.¹ Car la question évidente qui se rattache à cela c'est : En quoi consiste ces billes ? Depuis, notre représentation des « pierres édifiatrices » de la matière s'est fondamentalement modifiée. Remarquable a été en cela le rôle de la mathématique dans le développement de la théorie quantique.

Dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle déjà, James Maxwell avait récapitulé en une théorie unitaire le magnétisme et l'électricité avec ses célèbres équations. L'existence possible d'ondes électromagnétiques, ainsi que leur vitesse de propagation, s'en laissent dériver au plan purement mathématique. À la grande surprise des physiciens, celle-ci était identique à celle de la lumière déjà connue. À partir du moment où des ondes électromagnétiques purent effectivement être produites et que depuis notre monde s'est fondamentalement transformé, il fut solidement établi pour les physiciens que la lumière est pareillement une onde électromagnétique de ce genre. On parle depuis de spectre électromagnétique, de rayonnement X, d'ondes radio, y compris pour la lumière visible, les lumières ultraviolette et infrarouge.

Ce triomphe et d'autres de la physique théorique conduisirent à une confiance pratiquement totale dans les formules mathématiques. L'embarras fut d'autant plus grand lorsque celles-ci échouèrent pour décrire le rayonnement de ce qu'on appelle des corps noirs. Il s'agit du rayonnement qu'émet un corps noir soumis à des températures différentes. Le fer chauffé rougit tout d'abord en prenant une couleur rouge sombre, ensuite il s'éclaircit jusqu'à atteindre l'incandescence. Un phénomène connu — mais les équations de Maxwell, autrement si couronnées de succès, échouèrent à le décrire mathématiquement.

Le dualisme onde-particule

En 1900, Max Planck réussit ici la percée. Des semaines durant, il avait essayé d'adapter sa formule aux résultats des mesures. Il y parvint seulement au moment où il se résolut à faire un pas hardi. Jusqu'alors, Planck était été un opposant à la représentation de l'atome, il ne croyait pas aux particules infinitésimales de la matière. Mais pour que ses formules correspondissent aux résultats des mesures, il dut admettre que le rayonnement consistait en petites quantités d'énergie, pour ainsi dire en atomes d'énergie. Dont la grandeur se laissait calculer comme la fréquence f multipliée par un très petit nombre h , appelé par la suite « quantum d'action de Planck ». Ceci devint au cours de la décennie suivante la formule la plus célèbre : $E = hf$. Avec cela l'idée du quantum était née. Mais cette formule correspondait-elle à la réalité ? Les physiciens d'alors étaient sceptiques. On « savait » finalement que le rayonnement électromagnétique était une « onde », dans ces conditions, des particules d'énergies ne donnaient aucun sens. La formule fut mise de côté, avec quelques rares tentatives de résoudre l'énigme du rayonnement des corps noirs.

En 1905, un employé inconnu de l'office des brevets de Zurich, portant le nom d'Albert Einstein, lut la formule de Planck. Il comprit que son fondement logique était insuffisant. Ainsi partit-il d'avance des « atomes-d'énergie » dans le rayonnement et put de cette manière dériver la même formule. Il appliqua avec succès cette nouvelle idée des quanta sur un autre effet inexplicé, l'effet photon. Nonobstant cela, ces collègues restaient sceptiques. La conviction était trop forte que la lumière était une onde et ce consistait pas en particules.

Nous voulons réfléchir ici brièvement à ce sur quoi reposait cette conviction. Si vous envoyez des vagues d'eau au travers de deux fentes qui sont proches l'une de l'autre (expérience de la double fente), il en naît un modèle géométrique qui dépend de la longueur d'onde des vagues. On peut facilement comprendre la relation entre la vitesse des vagues, leur longueur et leur fréquence. Si l'on envoie une lumière monochromatique au travers d'une double fente appropriée (c'est-à-dire très petite), c'est un modèle parfaitement analogue qui apparaît. Au moyen d'une telle conclusion analogique, on peut coordonner chaque couleur de la lumière à une longueur d'onde. Étant donné que la vitesse de la lumière est connue, (quoi que cela puisse précisément signifier), on peut aussi en calculer une fréquence.

À partir de ces observations, il en fut habituellement conclu que la lumière était une onde. Cette conclusion est-elle pourtant contraignante ? En aucun cas. Nous avons formé les deux concepts de *longueur d'onde* et de *fréquence* en observant le comportement de l'eau. À cette occasion, nous nous sommes représenté des vagues idéales, avec des amplitudes et longueurs d'onde identiques. Or de telle vagues idéalisées n'existent pas du tout dans la réalité, car des vagues d'eau ont des amplitudes et longueurs d'onde diverses. Les « ondes » des physiciens sont une abstraction. Nous ne pouvons que créer des conditions sous lesquelles la lumière est engendrée comme des vagues

¹ Voir Rudolf Steiner über den Atomismus. Zwei Aufsätze aus dem Frühwerk [Rudolf Steiner a sur l'atomisme : Deux essais de l'œuvre précoce (Contributions à l'édition complète des œuvres de Rudolf Steiner 63), Dornach 1978, pp. 5-10.

d'eau. En vérité nous pouvons observer avec l'eau comment les vagues engendrent le modèle. Avec la lumière nous ne voyons pas de vagues, mais par exemple des noircissements ordonnés de manière rythmique sur une plaque photographique et nous nous représentons des vagues qui pourraient engendrer un tel modèle. Autrement dit : Nous nous servons d'un concept d'onde développé sur l'eau pour expliquer le modèle d'interférence au travers d'une double fente.

Dans ces circonstances, il y a une série d'expérimentations — rayonnement des corps noirs, effet photo-électrique et quelque temps plus tard, l'effet Compton — qui ne se laissent pas expliquer par la représentation d'une longueur d'onde. Einstein montra qu'avec la représentation de la lumière consistant en particules, elle se laissent aussi interpréter. La question était donc : Comment peut-on relier ces deux représentations, onde et particule ? Dans la physique classique, il n'y avait que des ondes, ou bien que des particules. Peut-on se représenter une bille qui se meut sur une trajectoire ondulatoire ? À peine. Il est encore plus difficile de comprendre le phénomène d'interférence avec l'aide des particules. Une crête d'onde et un creux d'onde peuvent s'annuler, mais deux billes, l'une à côté de l'autre, volant dans la même direction, ne le peuvent pas ! D'un autre côté, dans l'effet Compton, la lumière (plus exactement les rayons X) se comportent à l'instar d'une boule de billard qui en heurte une autre (un électron). Le problème c'était donc, pour le dire précisément : Des ondes ne peuvent pas se heurter comme des boules de billard. Des boules de billards ne peuvent pas s'annuler comme des ondes. Comment relier ces deux représentations contradictoires ?

La situation empira encore pour les partisans d'un modèle simple : en 1924, Louis de Broglie postula que la lumière n'est pas la seule à avoir des propriétés de particule, mais qu'aussi chaque « particule » avait des propriétés d'onde ! Il en dérivait même une formule pour la longueur de cette « onde matérielle ». Cette affirmation hardie fut expérimentalement confirmée en 1927, à la grande surprise de nombreux physiciens : Clinton Davisson et Lester Germer envoyèrent un faisceau d'électrons au travers d'un monocristal de Nickel et purent, en accord avec l'hypothèse de de Broglie, observer des phénomènes d'interférence ! Là-dessus d'autres « particules élémentaires » furent explorées sur leur caractère ondulatoire dans des conditions correspondantes. Toutes se comportaient donc aussi comme des ondes ? Il sembla dès lors impossible de se représenter de telles « pierres de construction ». Les « pierres élémentaires de base » de la matière (électrons, protons, et les neutrons, découverts en 1932) se comportaient-elles donc aussi comme des ondes ? La confusion était grande.

La naissance de la mécanique quantique

La percée réussit à Werner Heisenberg, à l'époque âgée de 23 ans seulement. Il était clair pour lui que la représentation de l'atome jusqu'alors, à l'instar d'un système-solaire en miniature, dans lequel les électrons, comme les planètes, tournaient autour d'un noyau chargé positivement était intenable. Au moment où, à l'été de 1924, souffrant d'une violente rhume des foies, il se réfugia sur l'île Heligoland. Il se remit sur place, escalada les falaises tout autour, apprit par cœur des poèmes de Goethe tirés du *Divan oriental-occidental* et il se creusa la cervelle au sujet du problème de l'atome. Il était influencé par la théorie de la relativité de Einstein, dans laquelle celui-ci exigeait que la physique ne soit abordée qu'au moyen de l'observation expérimentale. Tout ce qui n'était pas observé, ne devait pas entrer dans des théories, pour Einstein. L'orbite des électrons dans l'atome, ne pouvait pas être observée, on dut donc la laisser tomber [voir la note du traducteur dans la note 2, *ndt*]. La question devenait : Que pouvons-nous observer ? La réponse de Heisenberg : les raies spectrales.

Les raies spectrales de l'atome le plus simple, l'hydrogène fournissent deux informations : à la couleur observée peut être coordonnée une fréquence et une intensité. Tentons de nous représenter l'expérimentation : un courant électrique faible sous haute tension est envoyé dans un tube de verre rempli d'hydrogène à basse pression. Le gaz commence à briller. La lumière est ensuite envoyée au travers d'un réseau de diffraction et on obtient des couleurs isolées et non pas un spectre arc-en-ciel. À ces lignes colorées des fréquences sont coordonnées et leur intensité peut être mesurée.

Ces fréquences et leurs intensités étaient les informations observables sur l'atome d'hélium qu'Heisenberg utilisa. Il les ordonna dans un schéma rectangulaire, dans lequel les mathématiciens reconnurent plus tard ce qu'on appelle une matrice, et établit des règles de calcul avec lesquelles les résultats expérimentaux pouvaient être reproductibles. Et après des jours d'une lutte intense, les nombres furent concordants ; au matin, alors qu'il avait travaillé toute la nuit, il eut une expérience bouleversante :

J'eus le sentiment de contempler, au travers de la surface des phénomènes atomiques, un fond d'une beauté intérieure remarquable et la pensée fut presque vertigineuse pour moi que désormais, je devais suivre cette abondance de structures mathématiques, que la nature avait étalée là devant moi.²

« Trouver des structures mathématiques » devint dès lors le *leitmotiv* des physiciens sur leur cheminement d'exploration des secrets de la matière. Car toutes les tentatives pour se former des représentations concrètes des processus atomiques avaient mené à des contradictions non résolues.

2 Werner Heisenberg : *Der Teil und das Ganz [La partie et le tout]* Munich 1998, p.77.

[« On dit que l'électron est un constituant de la matière selon la méthode du réalisme naïf qui, en philosophie, dit que les pierres sont les constituants de la maison. Mais attention ! On entre avec l'*e* dans le domaine des particules « élémentaires » dont on ne peut plus dire, en 1992, si elles sont des constituants de la matière ou des objets créés par l'expérimentateur lorsqu'il soumet la matière à des énergies de plus en plus considérables (physique du noyau). Actuellement on connaît plus d'une centaine de ces particules : l'électron est utilisable dans la technique mais il ne peut pas être isolé. Nous verrons qu'il se comporte comme le photon et comme toute autre « particule » en mouvement : il est, selon la question expérimentalement posée, tantôt **onde** tantôt **particule**. Il faut donc bien se garder de l'illusion du « petit grain » en mouvement autour du « noyau ». **Pr. Pierre Feschotte** : *Chimie générale et analytique* — Université de Lausanne – Faculté des sciences, 1995 3^{ème} édition refondue (p.155). *Ndt*]

Dans ces circonstances, il était facile de présumer que cette remarquable contradiction entre comportement ondulatoire et comportement particulaire ne surgissait que pour les plus petits objets, tels que les électrons, protons, neutrons. Eh bien non, il n'en était pas ainsi ! Entre temps des phénomènes d'interférence peuvent aussi être démontrés pour des molécules C-60 énormes.³ Que l'on se représente ces molécules avec 60 atomes de carbone chacune. Chacune d'elles a une masse qui dépasse les millions de fois celle d'un électron. Elles sont bien « visibles » au microscope électronique, tout chimiste les qualifierait de molécules vraiment grosses. Et ces molécules sont censées se comporter comme des ondes, une molécule étant censée pouvoir éteindre une autre au lieu que leurs masses s'additionnent ? Cela contredit toutes nos représentations concrètes des molécules et de la matière ! Et la théorie mentionne que *toutes* les molécules possèdent cette propriété ondulatoire, c'est-à-dire qu'elles peuvent s'éteindre réciproquement. Cela voulait dire que la représentation du livre scolaire des atomes et molécules en petites boules de billard qui construisent le monde, était fondamentalement fautive.

L'impossibilité des représentations spatiales

Ce n'est pas l'unique contradiction pour notre représentation de l'espace. Prenons n'importe quel objet en main. Tournons-le sur lui-même sur son axe de 360° et regardons-le bien. Dans la mesure où nous avons choisi un objet solide, il a l'air d'avoir conservé exactement le même aspect qu'avant de l'avoir retourné. Prenons ensuite une feuille de papier ordinaire ; faisons-la tourner de 180° . Elle ressemble de nouveau à ce qu'elle était avant la rotation.

Les mathématiciens disent : Un objet, que l'on doit faire tourner de 360° sur lui-même pour qu'il reste identique, a comme *spin* 1. S'il est identique à lui-même après une rotation de 180° , comme la feuille de papier, alors il a comme *spin* 2. Mais pourriez-vous vous représenter un objet solide quelconque que l'on doive tourner à deux reprises sur lui-même, soit de 720° , afin qu'il soit de nouveau identique à lui-même ? Vous admettez : un tel objet n'existe pas et il ne peut pas en exister, c'est tout simplement impossible ! Et pourtant : en mécanique quantique de tels objets existent. Chaque électron, proton ou neutron a un *spin* $1/2$, c'est-à-dire qu'on doit le faire tourner sur lui-même de 720° , afin qu'il ressemble à ce qu'il était avant la rotation ! D'où les physiciens « savent-ils » cela ? Parce qu'ensuite leurs formules mathématiques délivrent le résultat correct ! Cela veut dire : la totalité du monde est édifié d'objets qui ne peuvent pas du tout exister !

Lorsque, étudiant en physique, j'interrogeai mes professeurs sur la manière dont on était censé se représenter une particule ayant un *spin* $1/2$, alors ils me répondaient que c'était là une propriété de mécanique quantique que l'on ne pouvait pas se représenter. C'est parfaitement juste, c'est impossible ! Est-ce que cela signifie, dans ces circonstances-là, que notre penser n'est pas en situation de comprendre la réalité ? Eh bien, ici, il nous fait absolument méditer la différence entre *comprendre* et *se représenter*. Il est impossible de se représenter un objet de *spin* $1/2$, car nous nous représentons toujours les choses dans un espace tridimensionnel et donc dans les trois dimensions : longueur, largeur et hauteur. La seule et unique conclusion possible ici c'est que ce ne sont pas là des objets tridimensionnels ! Nous reviendrons sur ce point en temps utile.

Un autre phénomène fascinant c'est ce qu'on appelle l'intrication quantique. On connaît souvent les propriétés d'un système qui consiste en deux « particules » ou plus, mais non pas les parties constitutives individuelles. Prenons, par exemple, deux électrons qui se meuvent séparément l'un de l'autre, et dont nous savons qu'ils ont un *spin* d'ensemble nul, c'est-à-dire qu'ils ont des *spin* opposés. Si nous mesurons le *spin* de l'un des deux, nous connaissons alors aussi celui de l'autre. À première vue, cela n'apparaît pas étonnant, mais la théorie quantique affirme que le *spin* des deux électrons, avant la mesure, est *indéterminé*. C'est seulement au moyen de l'expérimentation que l'on peut déterminer le *spin* des deux électrons, et ensuite alors, on connaît — sans aucune autre mesure — le *spin* de l'autre. Classiquement considéré, il n'y aurait que deux possibilités pour comprendre ce phénomène :

1. Les deux électrons avaient déjà un *spin* déterminé, avant la mesure, seulement, nous ne le connaissions pas encore. Alors la théorie quantique serait fautive ou incomplète et devrait être remplacée par une meilleure théorie.
2. Ou bien, l'électron mesuré influence l'autre, d'une manière encore non-éclairée, de sorte que la détermination du premier *spin* occasionne, de manière causale, le *spin* de l'autre. Étant donné que ni l'éloignement des deux électrons l'un de l'autre ne joue de rôle, et qu'aucun délai ne semble apparaître, cet effet dût s'en suivre sans perte de temps. Ceci se trouve néanmoins en contradiction avec la théorie de la relativité d'Einstein en conséquence de laquelle aucun effet ne peut se répandre plus vite que la vitesse de la lumière.

Einstein rendit attentif à ce problème dans un article rédigé en 1935 avec ces collaborateurs Boris Podolsky et Nathan Rosen. Depuis cette expérimentation est devenue célèbre sous l'appellation du paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen. Einstein voulait ainsi démontrer que la mécanique quantique n'est pas une théorie complète, car la deuxième option était exclue selon lui. Pourtant en 1964, John Stewart Bell réussit entre temps à produire une inégalité — ainsi appelée par lui — qui permettait une preuve expérimentale du paradoxe. Une telle inégalité pose de hautes exigences à l'édification et à la précision de l'expérimentation correspondante. Néanmoins il a pu depuis apporter la preuve à plusieurs reprises que la mécanique quantique avait raison et non pas Einstein.

Que signifie cela pour nos réflexions présentes ? Rien d'autre que dans des systèmes intriqués, les éloignements ne jouent aucun rôle. Les parties d'un tel système peuvent être de manière quelconque largement éloignées les unes des autres, elles forment néanmoins une unité. Exprimé autrement : ces phénomènes, de par leur nature même, ne sont nullement spatiaux ! Cet état de fait, nonobstant très remarquable, est aujourd'hui caractérisé comme la « non-localité » de la mécanique quantique ». Einstein se refusa, jusqu'à la fin de sa vie, à accepter cela, car pour lui

3 Voir Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Vos-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw & Anton Zeilinger : *Wave Particle Duality of C-60 molecules* dans *Nature* 401/680-682 (1999)

une réalité « non-spatiale » n'était pas représentable. Aujourd'hui ce phénomène de l'intrication est déjà techniquement mis à profit, en particulier dans ce qu'on appelle l'ordinateur quantique. — Oui, mais comment pouvons-nous comprendre la non-spatialité de la mécanique quantique ? Pour cela nous voulons jeter un coup d'œil à l'aspect mathématique de la mécanique quantique.

Le rôle de la mathématique

Il y a actuellement une bonne douzaine d'interprétations diverses de la mécanique quantique.⁴ Comment cela est-il possible pour une théorie de presque cent ans d'âge, extraordinairement couronnée de succès ? Lorsqu'on interroge un physicien là-dessus, il hausse typiquement les épaules et répond que cela ne vaut pas la peine de se casser la tête là-dessus, car finalement on dispose des formules et des méthodes de la mécanique quantique avec lesquelles on peut faire des prédictions très précises. Nous avons donc le phénomène intéressant d'un formalisme mathématiquement universellement reconnu, dont l'interprétation n'est nonobstant pas claire.

Dans les manuels de physique quantique les méthodes mathématiques sont commentées en détail sans en refléter de « qualité » quant à la mathématique mise en œuvre. On va tenter de caractériser de plus près ces « qualités » dans ce qui va suivre. À cette occasion, je m'appuie sur une indication de Rudolf Steiner :

Et si l'on veut réellement entrer dans les domaines de la réalité supérieure sur le réel-physique et si l'on caractérise celui-ci avec un signe positif, alors on est contraint de pourvoir le réel éthérique — par où l'on sort du spatial et que, donc, on entre déjà dans le spirituel — du signe négatif. Veut-on entrer dans l'astral, alors on ne s'arrange pas avec le spatial et le non-spatial, au contraire on doit justement entrer dans un troisième élément qui se comporte vis-à-vis du positif comme du négatif, comme l'imaginaire dans la formulation mathématique vis-à-vis du positif et du négatif. Et l'on serait pour ainsi dire même contraints, si de l'astral on passe dans l'entité vraie du Je, de mettre par écrit un concept qui serait supra-imaginaire vis-à-vis de celui imaginaire. [...] Il n'est pas possible de l'omettre — il ne s'agit que de savoir si on l'emploiera de manière correcte [...], de manière que l'on ne sorte pas du réel.⁵

Ne pas sortir du réel, avec les formulations mathématiques — que signifie cela ? Un premier pas vers la compréhension peut être de ne pas seulement saisir abstraitement ces domaines du nombre, mais de les remplir aussi d'expérience vécue et pour cela d'utiliser l'être humain entier et pas seulement la tête. Avec le réel-physique nous nous représentons la matière remplissant l'espace. C'est le domaine des nombres positifs. Avec les signes négatifs pour l'éthérique, nous pouvons alors nous représenter un effet de succion, dissolvant la matière.⁶

Le concept des nombres complexes n'est généralement pas connu, c'est la raison pour laquelle on va brièvement l'expliquer. Nous avons tous appris à l'école qu'il n'y pas de racine carrée possible à un nombre négatif, car un nombre réel multiplié par lui-même ne donne jamais un nombre négatif. Or les mathématiciens de la Renaissance ne s'en avouèrent guère satisfaits et ils développèrent donc pas à pas le concept des nombres imaginaires, pour lesquels Léonard Euler, au début du 18^{ème} siècle, introduisit l'unité imaginaire « i » : $i = \sqrt{-1}$. Gottfried Wilhelm Leibnitz les désigna en 1702 comme « un délicat et merveilleux refuge de l'esprit divin, presque une essence hybride entre être et non-être »⁷.

Comment peut-on se représenter un nombre imaginaire ? Les nombres positifs et négatifs peuvent être visualisés sur une droite numérique, ce par quoi vis-à-vis de ce que Steiner avait en tête, on a une abstraction. Mais un nombre imaginaire n'a aucune place sur cette droite. Pour le représenter, on introduit à angle droit sur l'axe réel un axe imaginaire. Un nombre complexe est ensuite représentable comme un point dans ce plan, avec une part réelle et une part imaginaire. Or, ces nombres se sont avérés très utilisables dans la théorie mathématique et les physiciens peuvent les utiliser pour la représentation simplifiée de processus vibratoires.

Dans la physique quantique leur importance va bien plus loin que leur simple utilité, car des événements quantiques sont décrits comme des événements dans des espaces dotés de coordonnées complexes. Tentons de nous représenter cela : Dans la physique classique des événements sont décrits dans un espace tridimensionnel à l'aide de trois axes de coordonnées x , y et z . Depuis Einstein, on y ajoute un quatrième axe, celui du temps imaginaire. En physique quantique, les axes de coordonnées sont déjà eux-même complexes, c'est-à-dire qu'ils ont déjà chacun une dimension réelle et une imaginaire ! Et le nombre des axes employés dépend du positionnement spécial du problème. Autrement dit : les équations de la physique quantique décrivent des événements qui ne se déroulent pas dans notre espace tridimensionnel ordinaire !

Et les « nombres « supra-imaginaires » que Rudolf Steiner coordonne au Je ? Peter Gschwind s'est préoccupé de cette question de manière très détaillée. Il en arrive à la conclusion que Steiner avait en tête une forme supérieure déterminée de matrice que l'on caractérise en physique quantique comme des « opérateurs ».⁸

Calculer le sensoriel à partir du supra-sensoriel

4 Voir https://de.wikipedia.org/wiki/Interpretationen_der_Quantenmechanik

5 Rudolf Steiner : *Impulsions de la science spirituelle pour le développement de la physique II (GA 321)*, Dornach 2000, p.234

6 Voir, à l'endroit cité précédemment, p.160.

7 Heinrich-Dieter Ebbinghaus et coll. (Éditeurs) : *Zahlen [Nombres]*, Berlin & Heidelberg, 1983, p.48.

8 Voir Peter Gschwind : *Zum Konzept der Ich-Zahlen [Au sujet du concept des Nombres-Je]*, *Mathematik-Physikalische Korrespondenz* n°267 (hiver 2016/17).

Dans ces circonstances, les expérimentations correspondantes ont lieu dans notre espace ordinaire. Dans le formalisme de la mécanique quantique, l'ordre expérimental est représenté par un opérateur, ou selon le cas, une matrice. Au plan géométrique, des matrices se laissent interpréter comme des règles de *mapping* [en français= « mappage », pour « applications » en informatique *ndt*] qui décrivent des images spéculaires [réfléchissements, réflexions, *ndt*], des rotations et des extensions. En physique quantique, le choix de la matrice appropriée est déterminé par l'ordre expérimental. Veux-je déterminer le lieu d'une « particule », alors la matrice projette le vecteur d'état totalement abstrait, appelé aussi fonction d'onde, qui renferme toutes les connaissances de la « particule » sur un *élément spatial* approprié, un système complexe de coordonnées. Veux-je en déterminer la vitesse (pour l'exprimer exactement, l'impulsion qui est étroitement reliée à la propriété d'onde de la « particule »), alors la construction expérimentale correspondante est décrite par une matrice qui projette le même vecteur d'état sur un système de coordonnées, dont les axes représentent des *vitesse*s ou selon le cas, des *impulsions*. (Il est intéressant que la théorie quantique énonce qu'il n'est jamais possible de déterminer « dans le même temps », pour le moins exactement, le lieu et la vitesse d'une « particule ». Ce phénomène est connu sous le nom de relation d'incertitude de Heisenberg.) Les valeurs obtenues sont encore complexes. Pour obtenir de réelles valeurs mesurables, elles doivent encore être multipliées par le vecteur complexe conjugué, ce par quoi, au plan géométrique, on obtient la longueur du vecteur projeté.

Tout cela a l'air bien compliqué et cela l'est aussi. Il s'agit aussi de ce qu'on appelle le « collapsus de la fonction d'onde lors de l'événement de mesure ». Je vais rendre cela plus clair par une comparaison. Représentez-vous une boîte de conserve cylindrique éclairée par un projecteur, éclairant un mur à l'arrière-plan. Selon la direction de projection, l'ombre peut être un rectangle ou un cercle. Cela étant, figurez-vous à présent que vous ne perceviez que l'ombre et de plus, que vous n'auriez aucune notion sur les objets tridimensionnels. Dans ces conditions, vous eussiez présenté le phénomène que le même objet, à chaque fois selon l'ordre expérimental, produit tantôt un cercle et tantôt un rectangle. Une contradiction qu'en apparence, on ne peut résoudre ! Elle se résout seulement si le caractère tridimensionnel de l'objet est reconnu, à savoir qu'il n'est ni rectangulaire ni circulaire mais justement c'est un cylindre.

Ainsi en est-il en physique quantique. Il n'y a aucune possibilité de résoudre la contradiction entre propriétés d'onde et propriétés de particule, aussi longtemps que l'on se représente spatialement les « pierres de construction du monde ». Le formalisme de la mécanique quantique décrit des processus de mesure comme des projections « d'objets » extra-spatiaux dans le monde de notre expérience. La nature de la projection — disons : l'expérimentation — détermine si l'objet non-spatial se révèle comme une onde ou bien comme une particule ! La physicienne américaine, Ruth Kastner exprime cela ainsi :

« La physique quantique exige que nous pensions « au-delà du bord de notre assiette », et ce bord d'assiette se démasque comme l'espace-temps lui-même. Le message de la physique quantique c'est que qu'il n'y a pas seulement d'espace absolu ou bien de temps absolu mais que cette réalité dépasse largement l'espace-temps. Pour parler en images, l'espace temps c'est le « sommet de l'iceberg » : sous la surface, se trouve un gigantesque monde invisible de possibilités. Et c'est ce vaste monde invisible qui est décrit par la physique quantique. Ceci n'est aucune idée nouvelle : un autre fondateur de la théorie quantique, Werner Heisenberg, expliquait qu'un objet quantique « est quelque chose qui se trouve entre l'idée d'un événement et l'événement effectif, une sorte étrange de réalité physique, qui se trouve exactement au beau milieu entre possibilité et réalité. » Heisenberg appelait ceci « *potenzia* », un concept de la philosophie grecque antique qui fut originellement introduit par le philosophe grec de l'Antiquité, Aristote. »⁹

Et Rudolf Steiner dit, quant à lui, dans son essai de 1904 déjà, *Mathématique et occultisme* :

La création mathématique plane à la limite entre le sensible et le monde purement spirituel. [...] C'est l'aspect substantiel de la contemplation mathématique qu'une création sensible individuelle puisse me conduire au-delà d'elle-même, qu'elle ne peut être pour moi qu'une métaphore pour un ample fait spirituel. [...] Cela étant, l'acte de connaissance mathématique a accompli des progrès importants à l'époque moderne. Il a accompli à l'intérieur de cette connaissance un pas essentiel dans le suprasensible. [...] Avec l'application du calcul infinitésimal sur les processus naturels en mécanique et physique nous ne réalisons de fait rien d'autre que de calculer sensiblement à partir du supra-sensible. Nous appréhendons le premier à partir de son commencement suprasensible ou son origine. Pour la contemplation sensible le différentiel est un point ou zéro. Mais pour la saisie spirituelle, le point devient vivant, le zéro devient une cause première. L'espace lui-même en est alors animé pour l'appréhension spirituelle. Saisissons-le de manière sensible, alors ses points ne sont que petites parties infinies mortes ; saisissons-nous ce point comme une grandeur différentielle, alors la vie intérieure surgit dans le côté à côté. L'extension elle-même devient la création de ce qui est sans extension. Ainsi la vie surgit du calcul infinitésimal dans la connaissance de la nature. Les sensible est ramené jusqu'au point du suprasensible.¹⁰

L'essentiel ici c'est bien que dans le formalisme de la physique quantique, (aussi bien que dans le calcul infinitésimal aujourd'hui appelé calcul différentiel) le rôle d'opérateur du « nombre-Je » de Steiner, assume le rôle

9 Ruth Kastner dans *Quantum Physics and The Need For A New Paradigm* — www.npr.org/sections/13.7/2015/09/27/443899221/quantum-physics-and-the-need-for-a-new-paradigm?t=1591814287890 — Kastner est une physicienne quantique dans un groupe « Fondement de la physique » de l'université du Maryland, USA. Elle a rédigé divers ouvrages dont, entre autre : *Understanding Our Unseen Reality : Solving Quantum Riddles [comprendre notre réalité non-vue : résoudre l'énigme du quantum]*, Londres 2015

10 Rudolf Steiner : *Mathématique et occultisme*, dans du même auteur : *Philosophie et anthroposophie (GA 35)*. Dornach 1984, pp.8-13.

central. Avec cette mathématique « supra-sensible » on parvient à décrire des phénomènes au domaine frontalier de la matière et de l'esprit.

Nouveaux concepts de l'espace et du temps

De ce qui précède il devient évident que des électrons, atomes, molécules etc, ne sont pas ces petites billes habituellement représentées dans nos ouvrages scolaires. Les paradoxes de la physique quantique signalent beaucoup plus qu'il est impossible de les concevoir comme des structures spatiales au sens traditionnel. Depuis presque cent ans, les physiciens s'efforcent de comprendre ces phénomènes sans en arriver à une interprétation universellement reconnue. C'est la situation classique, dans une discipline scientifique qui précède un changement de paradigme, telle que Thomas S. Kuhn l'a décrite dans son ouvrage célèbre *La structure des révolutions scientifiques* (en 1962) : une vaste théorie englobante, comme la mécanique quantique, permet aux chercheurs de comprendre beaucoup de phénomènes et de faire des prédictions sur d'autres expérimentations sur une période assez longue. Mais le moment arrive où les problèmes non-résolus s'accumulent et requièrent d'autres explications : bref, un changement de paradigme s'impose. L'élément particulier de la situation actuelle repose, cela étant, dans le fait que certes, l'aspect mathématique de la théorie « fonctionne », mais nous ne comprenons pas ce que les formules disent véritablement.

Tournons-nous une fois encore sur la mathématique. Celle-ci nous sort du domaine sensible pour nous mener dans un domaine supra-sensible. Or, accepter ce fait c'est bien difficile pour un physicien qui est le produit d'une école matérialiste. Quel sera l'aspect du changement de paradigme à venir ? Le physicien Anton Zeilinger pense à ce propos :

Il semble donc que la physique quantique, lorsqu'il s'agit de mesures dans le domaine des particules intriquées, ne connaisse plus l'espace ni le temps. Il reste à attendre quelles conséquences cela a sur nos représentations de l'espace et du temps ou sur l'espace-temps. Celui-ci même ne peut pas être exclu de telles réflexions. Je propose que nous ayons besoin d'une nouvelle analyse profonde de l'espace-temps, une analyse conceptuelle qui corresponde à celle du philosophe-physicien viennois, Ernst Mach, qui a poussé l'espace absolu et le temps absolu de Newton hors de leur trône. L'espoir étant que nous ayons à la fin une nouvelle physique, analogue à la nouvelle physique de Einstein, dans laquelle sont les deux théories de la relativité.¹¹

Une analyse profonde et nouvelle de l'espace-temps — mais c'est exactement ce que Steiner a réalisé ! Pour Steiner l'espace et le temps, ni les perceptions sensibles ne sont des catégories données *a priori* comme Immanuel Kant les a pensées. Je ne peux pas voir ou concevoir ni l'espace en soi ni le temps en soi. Ce sont beaucoup plus des concepts formés aux perceptions. Il s'ensuit que ni l'espace, ni le temps n'existent « en soi », ce sont au contraire des abstractions réalisées à partir des perceptions sensorielles concrètes.¹² Que l'espace soit un concept qui requiert une activité idéale, devient particulièrement évident chez les êtres humains nés aveugles, qui n'apprennent à voir que bien plus tard à la suite d'une opération. Il leur faut un certain temps pour pouvoir voir spatialement et tous n'y parviennent pas. Voir spatialement est une faculté apprise, portée par les pensées. Et au sujet du temps, Rudolf Steiner remarque qu'il

apparaît seulement là où l'essence d'une chose entre en *apparition*. Le temps appartient au monde phénoménal. Il n'a encore rien à faire avec l'essence même. Cette essence n'est à concevoir qu'idéelle. Seul celui qui ne peut pas remonter de l'apparition à l'essence, hypostasie le temps comme ayant précédé des faits. Mais il a alors besoin d'une existence qui survive aux changements. En tant que telle, il conçoit dès lors une matière indestructible. Avec cela il a ainsi créé une chose sur laquelle le temps ne doit pas avoir de prise, un élément persistant au travers de tous les changements. Mais à vrai dire, il n'a montré ainsi que son incapacité à pénétrer de l'apparition temporelle des faits à leur essence, qui n'a rien à faire avec le temps. Car puis-je dire de l'essence d'un fait : elle naît ou elle meurt ? Je peux seulement dire, que son contenu conditionne un autre et qu'ensuite cette condition apparaît comme une succession temporelle. L'essence d'une chose ne peut pas être détruite ; car elle est totalement en dehors du temps et conditionne même ce dernier. Ainsi avons-nous mis en lumière deux concepts, pour lesquels on rencontre encore peu de compréhension, l'*essence/être* et l'*apparition/phénomène*. Celui qui conçoit la cause correctement de notre façon, celui-là ne peut plus guère chercher de preuve d'indestructibilité de l'essence d'une cause, car la destruction du concept de temps se déduit en soi, lequel n'a rien à faire avec l'essence.¹³

Étant donné que les chercheurs et philosophes actuels ne peuvent ou ne veulent pas reconnaître la réalité spirituelle des concepts, ils n'ont pas la capacité de penser l'*essence/être* et l'*apparition/phénomène*. Et néanmoins, afin de disposer d'une base « solide » [guillemets du traducteur], le concept de durée, d'indestructibilité — lequel en vérité appartient à l'*essence/être* des choses — se voit projeté dans le monde physique sous la forme, ainsi désignée Théorème de conservation, tel que, par exemple, la conservation de l'énergie (la masse y est incluse comme cas spécial), impulsion et charge électrique.

11 Anton Zeilinger : *Quantum Entanglement Is Independent Of Space and Time* [L'imbraglio quantique est indépendant de l'espace et du temps] — www.edge.org/response-detail/26790

12 Voir Rudolf Steiner : *Introduction aux écrits de science naturelle de Goethe*, (GA 1), Dornach 1987, p.137.

13 À l'endroit cité précédemment, pp.273 et suiv. Soulignement en caractère italique dans l'original.

Est-il pensable que des physiciens compétents acceptent la dimension spirituelle de la réalité ? Absolument ! Ainsi le déclara Hans-Peter Dürr, élève connu de Heisenberg :

Dans les profondeurs difficilement saisissables, dans le monde des infiniment petits, les « choses » ne sont plus guère des choses — c'est pourquoi la révolution ne veut pas rentrer dans les têtes. [...] Il n'y a plus de chose, seulement une forme et des changements de forme : la matière n'est pas composée de matière, mais de purs essences/êtres de forme et de potentialités. [...] Au fond [« fond », au sens propre ici, *ndt*] il n'y a qu'esprit, mais celui-ci se sclérose, et c'est uniquement sa sclérose que nous percevons comme matière.¹⁴ [*wahr-nehmen* = « prendre pour vrai » (ou encore « perce-valoir »), donc à prendre ici, au **sens littéral et concret**, *ndt*]

Il n'y a pas de chose, seulement des essences de formes ! Il n'y a que l'esprit qui s'encroûte en matière ! À un autre endroit, Dürr écrit :

À partir de la vue en mécanique quantique, il n'y a donc plus de monde existant temporellement et communément objectivable, au contraire, ce monde se produit de neuf pour ainsi dire à tout instant. Le monde y apparaît dans son unité, comme un état unique, singulier, qui ne se laisse pas interpréter comme une somme d'états particuliers. Le monde « présent » n'est pas substantiellement identique avec le monde de l'instant passé. Mais le monde de l'instant passé préjudicie les possibilités des mondes à venir de manière telle que, dans une certaine considération perdant toute finesse, il apparaîtrait tel qu'il consistât en particules et formes d'apparition déterminées, comme si elles préservaient leur identité dans le temps, par exemple, comme des particules élémentaires/atomes.¹⁵

Peut-on exprimer plus clairement ici sur le fait que la physique se heurte à la frontière de la matière, à l'esprit ? — Rudolf Steiner disait, dans la conférence du 24 octobre 1907 :

Si nous allons derrière la tonalité, derrière la lumière, nous ne rencontrons pas d'atomes matériels qui entrent dans notre rétine, l'imprègnent et, par cette imprégnation, produisent la représentation de la couleur et de la lumière. Si nous regardons vraiment là-dedans qu'y trouvons-nous ? L'esprit ! La couleur se comporte à l'égard de l'esprit comme la glace à l'égard de l'eau. La note se comporte vis-à-vis de l'esprit comme la glace vis-à-vis de l'eau. Au lieu de ce monde fantastique d'un bourdonnement d'atomes en vibrations, le vrai penseur et le vrai investigateur de l'esprit trouvent l'esprit, la réalité spirituelle, derrière ce qu'ils voient et entendent, de sorte que la question de la nature de la matière perd tout son sens. Car comment fait-on réponse à la question de la nature de la matière pour l'investigateur de l'esprit ? Qu'est-ce qui nous entoure dehors dans le monde et qui nous apparaît comme de la matière ? C'est l'esprit ! Nous devons en rechercher l'essence en nous-mêmes. Ce que nous sommes nous-mêmes au plus profond de notre être, ce sont toutes ces autres choses dans le monde, seulement sous une autre forme.¹⁶

Autrement dit : Il y a une unité entre notre « monde le plus intime » et le monde des choses. Mais cela est le concept du *Logos*, comme il était conçu chez Héraclite.¹⁷ — Dans une entrevue du 7 décembre 2012, Zeilinger déclara au sujet de l'interprétation du phénomène de l'intrication des particules élémentaires :

Qu'est-ce que cela nous raconte sur le monde ? Une direction d'évolution énonce que le concept d'information est plus important que les concepts d'espace et de temps et que l'information est manifestement indépendante de l'espace et du temps. [...] Pour moi, ceci fait allusion à une tendance que l'information est plus fondamentale que tous les autres concepts. Déjà l'Évangile de Jean débute par « Au principe était le Verbe ». Cela je peux aussi le traduire par information.¹⁸

La naissance du monde matériel à partir du Verbe, à partir du *Logos* ! La majorité des physiciens est encore par trop intriquée dans la tradition matérialiste, pour vouloir suivre de telles idées. Mais toute une série de grands pionniers de la physique quantique pensent dans cette direction. Je pense que nous nous trouvons au début d'un puissant bouleversement dans notre compréhension du monde, comparable à celui de la Renaissance. À cette époque, l'esprit humain investigateur dut se libérer du dogme ecclésiastique, aujourd'hui il s'agit de surmonter le dogme matérialiste. La naissance perpétuelle du monde matériel à partir du *Logos* — n'est-ce pas une idée libératrice ?

Die Drei 7-8/2020.
(Traduction Daniel Kmiecik)

Dipl. Phys. **Martin Wigand**, thèse d'université en 1951, trois années de recherche à l'université Heidelberg (Structure hyperfine de l'hélium myonique. Après cela professeur Waldorf de Mannheim de 1983 à 1991, ensuite émigration en Afrique du Sud, sur place enseignant à diverses écoles et chargé de cours dans la formation des professeurs Waldorf. En retraite depuis 2019 — Contact : mwigand58@gmail.com

14 Anton Zeilinger : *Quantum Entanglement Is Independent Of Space and Time [L'imbraglio quantique est indépendant de l'espace et du temps]* — www.edge.org/response-detail/26790

15 Du même auteur : *Geist und Natur*, Munich & Vienne 1989, p.38.

16 Rudolf Steiner : *La connaissance de l'âme et de l'esprit (GA 56)*, Dornach 1985, pp.70 et suiv.

17 Voir Karl-Martin Dietz : *Heraklit von Ephesus*, Stuttgart 2004, pp.78 et suiv.

18 www.wienerzeitung.at/nachrichten/wissen/natur/506880-Das-Loch-im-Verstaendnis-der-Wely.html