

Mots & maux de la physique quantique¹

Critique épistémologique et problèmes terminologiques

par Jean-Marc LÉVY-LEBLOND
Départements de physique et de philosophie
Université de Nice - Parc Valrose - 06108 Nice Cedex
jml1@math.unice.fr

Un film peu connu d'Alfred Hitchcock, *Le rideau déchiré* (1966), raconte une histoire d'espionnage scientifique. On y voit une scène étrange où deux physiciens s'affrontent sur une question théorique. L'un d'entre eux gribouille furieusement équations et figures sur un tableau noir, puis l'autre s'empare de la craie et du chiffon pour effacer avec rage ces signes cabalistiques et les remplacer par d'autres jusqu'à ce que le premier à son tour lui arrache la craie, etc. Leur "discussion", si l'on peut dire, est entièrement muette. Rien ne saurait être plus éloigné de la réalité que cette représentation de la physique théorique comme une connaissance aphasique constituée de purs symboles mathématiques – même s'il faut bien admettre la prégnance de cette représentation chez les profanes. Loin d'être une grande muette, la science est fort bavarde, et même ses disciplines les plus formalisées n'échappent pas à l'emprise de la langue : la physique se fait avec des mots [1]. La physique moderne a cependant montré à l'égard de son expression verbale une étonnante désinvolture, qui n'a pas été sans amplifier, sinon créer, certaines des difficultés épistémologiques et pédagogiques qui continuent à l'obérer – sans parler des limitations culturelles qu'elle rencontre. C'est ce que l'on voudrait montrer ici sur le cas princeps de la physique quantique.

PHYSIQUE CLASSIQUE ET LANGAGE ORDINAIRE

Toute discussion sur le rapport entre physique quantique et langage doit en revenir à Bohr, dont les prises de position ont défini une problématique encore vivace et rarement remise en question. Bohr considérait comme indépassable les formes d'expression de la physique classique, et tenait pour irréalisable et condamnable le désir de trou-

1. Cet article a été écrit pour un numéro spécial à paraître de la Revue Internationale de Philosophie consacré aux problèmes épistémologiques de la physique quantique, sous la direction d'E. KLEIN, reproduit ici avec son aimable autorisation.

ver des formes d'expression spécifiques au domaine quantique. Il s'agissait pour lui d'une impossibilité de principe, qu'il énonça sans se lasser. Il écrit ainsi :

«(...) it is decisive to recognize that, however far the phenomena transcend the scope of classical physical explanation, the account of all evidence must be expressed in classical terms. The argument is simply that by the word "experiment" we refer to a situation where we can tell others what we have done and what we have learned and that, therefore, the account of the experimental arrangement and of the results of the observations must be expressed in unambiguous language with suitable application of the terminology of classical physics.» [2].

S'il est coutumier de déplorer la relative obscurité des écrits de Bohr, on n'a peut-être pas assez noté que, concernant la question du langage, sa position manque non seulement de clarté, mais aussi de cohérence. Ses profondes ambiguïtés apparaissent si l'on confronte la citation précédente à celle-ci :

«It lies in the nature of physical observation (...) that all experience must ultimately be expressed in terms of classical concepts. The unambiguous interpretation of any measurement must be essentially framed in terms of the classical physical theories, and we may say that in this sense the language of Newton and Maxwell will remain the language of physicists for all time. (...) Even when the phenomena transcend the scope of classical physical theories, the account of the experimental arrangement and the recording of observations must be given in plain language, suitably supplemented by technical physical terminology. This is a clear logical demand, since the very word 'experiment' refers to a situation where we can tell others what we have done and what we have learned.» [3].

En fait, on ne sait pas très bien en quel sens Bohr utilise le mot "langage" dans ces réflexions. S'il s'agit pour lui du langage en général, sa position ne prête guère à controverse et frôle la banalité ; car le langage humain (par-delà la diversité des langues particulières) est un, et il ne saurait y avoir de communication, orale ou écrite, qui n'y recoure, que ce soit en physique ou dans tout autre domaine. L'impossibilité de créer ex nihilo un langage radicalement nouveau, qui supposerait des structures syntactiques inédites, n'a rien à voir avec la physique quantique comme telle, et découle simplement de l'inéluctable continuité et communauté de toute expérience humaine. De fait, il a été souvent remarqué que les formes scientifiques du langage pour l'essentiel ne diffèrent du discours ordinaire que par l'usage de substantifs et d'adjectifs spécialisés, les verbes spécifiques y étant fort rares et se rapportant principalement à des actions concrètes. Quant aux expressions générales, les réserves formulées par Bohr sur l'emploi des inévitables verbes "être" et "avoir", ne sont guère plus pertinentes quand il s'agit d'ob-

jets quantiques plutôt que d'êtres humains par exemple. Les difficultés se manifestent lorsque l'on passe de considérations syntactiques aux problèmes sémantiques, et, plus précisément, au choix des termes que nous utilisons pour décrire le monde. Il est certes possible de défendre l'idée que la science devrait n'introduire aucun terme particulier et s'en tenir aux mots de la langue ordinaire, de façon à éviter tout hiatus entre l'expérience commune et la pratique scientifique. Mais toute la science devrait alors être reformulée, puisque dès ses débuts elle s'est ingéniée à créer de nouveaux mots ou à en détourner d'anciens afin de formuler ses notions propres. Bohr, certes, est conscient qu'il est impossible de faire de la science sans utiliser un vocabulaire spécial. Il considère néanmoins la terminologie scientifique comme une «convention inessentielle», qui ne conduit pas à une coupure d'avec la langue commune. Il considère la physique classique – et elle seule – comme un simple prolongement de la pensée commune :

«From a logical standpoint, we can by an objective description understand a communication of experience to others by means of a language which does not admit ambiguity as regards the perception of such communications. In classical physics, this goal was secured by the circumstance that, apart from unessential conventions of terminology, the description is based on pictures and ideas embodied in common language, adapted to our orientation in daily-life events. The exploration of new fields of physical experience has, however, revealed unsuspected limitations of such approach and has demanded a radical revision of the foundations for the unambiguous application of our most elementary concepts (...)» [4].

Les «nouveaux champs» auxquels Bohr fait allusion sont évidemment ceux de la physique quantique. Mais il semble extrêmement difficile de justifier une telle coupure dans le développement de la science, et de juger ainsi que la création de nouveaux termes était acceptable (car «inessentielle») jusque vers 1900, pour devenir inadmissible ensuite.

En vérité, le caractère non-intuitif, pour ne pas dire contre-intuitif, de la nouvelle physique, que Bohr invoque pour justifier son précepte de s'en tenir aux termes classiques, n'est en rien une particularité du domaine quantique. La physique newtonienne, c'est-à-dire la mécanique corpusculaire, peut à la rigueur être considérée comme une extension "naturelle" de nos «images et idées» ordinaires adaptée au monde des cailloux et des balles ; mais une telle interprétation sollicite déjà considérablement les concepts théoriques mis en jeu en les rabattant assez abusivement sur les notions courantes : il suffit de remarquer à quel point le concept newtonien de "masse ponctuelle", c'est-à-dire d'un objet tout à la fois matériel et dépourvu d'extension, distend le lien entre représentations intuitives et conceptualisations scientifiques. Croire, comme le fait un épigone de Bohr, que «la mécanique classique est une idéalisation mathématique directe de cette part du langage ordinaire qui traite du monde extérieur, [de sorte que] la

réalité de ce monde est directement transmise aux objets de la physique classique» [5] constitue une grave sous-estimation des efforts héroïques qui ont abouti à la théorisation de cette physique par Galilée, Newton et bien d'autres. En tout état de cause, par-delà la mécanique, le XIX^e siècle dans son ensemble a été témoin d'un mouvement permanent et diversifié d'écart entre la pensée physique et la conception spontanée du monde. La thermodynamique comme l'électromagnétisme transcendent nos idées usuelles à un point tel qu'il s'est révélé impossible de les traiter par la langue ordinaire, bien plus encore que pour la mécanique. En réalité, «*le langage de Newton et Maxwell*», pour reprendre l'expression de Bohr, n'existe tout simplement pas. La plupart des termes que Bohr semble considérer comme le constituant et y possédant une signification claire, ne furent introduits en physique qu'au cours du XIX^e siècle, et n'appartenaient certainement pas au vocabulaire courant. Ainsi, le mot "énergie", étranger à la terminologie newtonienne, a pour référent un concept qui ne fut pas clarifié avant le milieu du siècle dernier, et ne rentra dans l'usage commun que bien plus tard – sans doute pas avant le milieu de ce siècle-ci. Une démonstration encore plus probante pourrait être faite à partir du terme "entropie", qui désigne sans doute l'un des concepts les plus abstraits de la physique et suscite encore aujourd'hui des polémiques épistémologiques aussi sérieuses que celles qui ont cours dans le domaine quantique, sans parler du caractère souvent abusif de son exploitation dans le discours ambiant. Il n'est pas jusqu'à la notion apparemment élémentaire à nos yeux de "potentiel" qui n'exhibe une histoire aussi complexe : introduite formellement par Laplace pour la gravitation et Poisson pour l'électricité, elle ne fut dénommée que plus tard par Green, et resta considérée jusqu'à la fin du XIX^e siècle comme fort abstraite, au point de n'être introduite dans l'enseignement universitaire qu'avec beaucoup de prudence [6].

Mais le cas le plus clair est peut-être celui du concept de "champ" dont l'émergence nécessita plusieurs décennies, de Faraday à Maxwell, qui semble avoir été le premier à utiliser le mot dans son article fameux de 1865 [7], bien qu'il s'en fit une idée fort différente de celle qui s'est imposée depuis ; pour lui, le champ caractérisait l'état dynamique d'un milieu matériel sous-jacent, l'éther, qu'il se représentait en termes mécaniques. Le champ électromagnétique n'accéda pas à un statut ontologique autonome avant les années 1900 et la déconfiture finale de l'éther. Ainsi, le mot ici précéda l'idée et prépara sa pleine extension ; tout décret normatif de style bohrien interdisant l'introduction de termes étrangers à la théorie classique (au sens newtonien du terme, c'est-à-dire mécanique) aurait certainement retardé et entravé le développement de l'électromagnétisme, et, par-delà, des théories des champs, c'est-à-dire de la physique comme nous la comprenons aujourd'hui. Car on peut à bon droit défendre l'idée que la plus profonde révolution de la physique n'eut pas lieu en 1905 (relativité) ou 1905-1913 (quanta), mais, justement, en 1865, avec l'avènement d'un type complètement nouveau d'entité physique, de nature non-mécanique : le champ, continu et non-localisé. Comme l'indique un expert en matière de révolution scientifique :

«Before Maxwell, people thought of physical reality – in so far as it represented events in nature – as material points (...). After Maxwell, they thought of

physical reality as represented by continuous fields, not mechanically explicable (...). This change in the conception of reality is the most profound and the most fruitful that physics have experienced since Newton.» [8].

Ce jugement d'Einstein date du centenaire de la naissance de Maxwell, en 1931, c'est-à-dire bien après la naissance de la physique quantique – et de la relativité... Ainsi, bien que Bohr n'ait sans doute pas envisagé cette interprétation littérale, nous pouvons sans doute prendre au mot son assertion selon laquelle c'est «l'exploration de nouveaux *champs* de la réalité qui a demandé une révision radicale de nos concepts les plus élémentaires.»

On peut sentir par ailleurs dans la position de Bohr un certain malaise quand il admet que l'utilisation de la langue ordinaire doit être «adéquatement complétée par la terminologie technique de la physique». Serait-ce à dire que Bohr considère ces termes techniques comme extérieurs au réseau de sens du langage proprement dit, et remplissant un rôle purement formel, à l'instar des notations symboliques, leur seule fonction étant de désigner sans ambiguïtés telle procédure théorique ou tel appareillage expérimental ? Cependant, comme le montrent les exemples évoqués plus haut, même les *termes* techniques les plus ésotériques sont de véritables *mots* et charrient une lourde charge de connotations culturelles et d'associations conceptuelles [9]. Il est donc pour le moins problématique d'imaginer ce que pourrait être un critère de discrimination permettant de séparer le lexique technique de la matrice du langage ordinaire qui l'englobe. Nombre de ces termes techniques sont empruntés au vocabulaire courant ; qu'ils se voient conférer une signification spécifique et restreinte ne suffit pas à couper les profondes racines qu'ils plongent dans les champs des pratiques non-scientifiques – et les mots “racine” et “champ” fournissent précisément un exemple de cette assertion. Réciproquement, bien des mots créés pour le discours scientifique et initialement réservés à son usage, finissent par dériver vers la langue commune où ils se chargent de nouveaux sens qui viennent en retour colorer leur signification technique : les termes “énergie” et “entropie”, “électricité” et “magnétisme” pourraient utilement être étudiés de ce point de vue.

Si l'on suit Catherine CHEVALLEY quand elle relie les idées de Bohr sur le langage à la tradition philosophique allemande, et tout particulièrement à l'œuvre de Wilhelm von Humboldt [10], on ne peut manquer de noter que ces travaux linguistiques, s'ils reçurent une attention renouvelée dans les années vingt de ce siècle, remontent en fait au début du XIX^e, et furent menés dans le contexte d'une conception de la science complètement dominée par le paradigme newtonien. Il n'est donc pas surprenant que ces théories n'aient guère été en mesure de rendre pleinement justice aux profondes mutations conceptuelles et langagières qu'a connue la physique au cours du XIX^e siècle. Il faut remarquer au surplus qu'au début du XX^e siècle, lors de la formation profession-

nelle de Bohr, le concept de champ, pour être désormais admis, n'en était pas moins fort récent et perçu comme tel. On peut alors se demander comment il était possible pour Bohr de considérer les idées et les mots alors très récents de la théorie des champs comme appartenant, au même titre que ceux de la mécanique newtonienne, à une physique classique indéfinie et indifférenciée. Une explication plausible est qu'une rupture imminente est certainement ressentie comme bien plus exigeante qu'une rupture déjà accomplie – au moins pour ceux qui doivent accomplir le nouveau saut. Ainsi, on peut comprendre que Bohr, face à la tâche extraordinairement ardue de concevoir une nouvelle théorie n'ait pas dû ni voulu opérer de distinctions au sein de ce qui était alors la science établie. Sa stratégie (contrairement à celle de Heisenberg, par exemple) fut de faire fond sur la physique classique, et de l'utiliser aussi loin que possible – allant outre son domaine de validité naturel. On a souvent remarqué que Bohr, tel Moïse, n'entra pas véritablement au cœur de la Terre promise quantique. Il fit jouer avec une dextérité admirable son “principe de correspondance” et sa notion de “complémentarité” pour ajouter à la théorie classique la plus légère touche quantique qui puisse ouvrir des perspectives sur le nouveau monde. On peut donc comprendre le rôle heuristique profond de son insistance sur les descriptions classiques – et admirer sans réticence l'ampleur des résultats qu'il obtint sur une base si réduite [11], indépendamment des réserves que l'on peut formuler sur les fondements philosophiques de sa position [12]. Ses collaborateurs et successeurs par contre, explorèrent le nouveau continent quantique bien au-delà des régions frontalières accessibles à l'aide du seul principe de correspondance, et y développèrent un formalisme original et novateur, mais sans pour autant produire une terminologie spécifique aussi ambitieuse. Cette insuffisance n'est guère facile à interpréter, d'autant que Heisenberg, par exemple, avait, quant au rôle du langage dans la science, une conception fort différente de celle de Bohr, et bien plus dynamique [13].

Il faut donc enfin réaffirmer que la création de mots nouveaux est un processus constitutif de la connaissance scientifique, qui doit accompagner l'émergence de ses notions neuves. Tel a été le cas pendant presque toute l'histoire de la science, hormis au cours du siècle finissant, où l'inventivité langagière a connu une régression drastique, tout au moins en physique (la mathématique et la biologie présentent à cet égard un bilan plus satisfaisant). Il y a même un paradoxe double à constater que jamais les physiciens n'ont produit tant d'idées et créé si peu de mots, et qu'ils ont recouru à des mots d'autant plus concrets et communs que leurs idées étaient plus ésotériques et abstraites (voir les “couleurs”, “saveurs”, “charme” et “beauté” des “quarks”, qui, malgré leur littéraire origine chez Joyce, ne portent jamais qu'un nom de fromage allemand). On ne peut s'empêcher de penser que ces déficiences linguistiques sont d'une façon ou d'une autre liées à la domination en physique d'une langue unique, qui, au surplus, a pendant quelques décennies été largement mise en œuvre par des étrangers – puisque la plupart des grands noms de la physique des années trente ont vécu une transition sans doute douloureuse et peut-être inhibante, de l'allemand vers l'anglais. Plus récemment, c'est

sans doute la mainmise de la médiatisation publicitaire sur la communication scientifique proprement dite qui explique le recours simpliste à des expressions imagées mais trompeuses, comme “big bang” ou “chaos”.

PHYSIQUE QUANTIQUE ET LANGAGE “EXTRAORDINAIRE”

Les toutes dernières décennies ont vu une étonnante extension de nos capacités à manipuler et exploiter les phénomènes quantiques, d'abord à l'échelle macroscopique (lasers, supraconducteurs, superfluides, communication quantique, etc.), puis désormais à l'échelle “nanoscopique”, celle-là même des atomes et des molécules (électronique à un électron, optique à un atome, nanotechnologies diverses, etc.) [14]. Dès lors, notre familiarité croissante avec les phénomènes quantiques a permis l'émergence de nouvelles formes d'intuition, et donc, nécessairement, de nouveaux modes d'expression. Nous, physiciens quantiques, avons donc créé un nombre respectable de termes originaux ; car nous ne suivons *pas* la règle bohrienne restreignant nos formulations au langage classique – même pour ceux d'entre nous qui continuent à affirmer leur fidélité à une prétendue orthodoxie copenhaguienne. Toute publication professionnelle dans ce domaine illustre cette assertion, comme le montre, à titre d'exemple, la première page d'un article où toutes les expressions non-classiques sont soulignées (figure 1).

Nous faisons donc pousser de nouvelles fleurs dans notre jardin terminologique. Mais je prétends que nous ne le cultivons pas avec assez de soin – il se pourrait d'ailleurs que cette opinion reflète une ancienne opposition entre la croissance apparemment libre des jardins à l'anglaise, et l'ordre méticuleusement imposé des jardins à la française. En tout cas, chaque jardinier amateur sait quels soins exige un jardin, qu'il s'agisse de le sarcler pour en ôter les plantes mortes, de tuteurer les jeunes pousses fragiles, ou de planter de nouvelles variétés.

a) *Sarclage*

La physique quantique désormais est assez vieille – près d'un siècle ! – pour avoir connu, comme toute théorie établie, les complexes processus de refonte interne et de restructuration de ses notions, qui conduisent tout naturellement certaines expressions à l'obsolescence. Pourtant, nous conservons trop souvent de façon acritique des termes qui ont perdu leur fonction historique et leur sens conceptuel. De tels archaïsmes ne sont pas réservés à la physique quantique, certes (que l'on pense au prétendu “courant de déplacement”² de l'électromagnétisme maxwellien, source de tant de confusions pédagogiques), mais ils y sont particulièrement prégnants.

2. Dans la suite de cet article, j'utiliserai délibérément de déplaisants guillemets anglais inversés pour dénoter les termes que je mets en cause.

Experimental quantum teleportation

Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl, Harald Weinfurter & Anton Zeilinger

Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstr. 25, A-6020 Innsbruck, Austria

Quantum teleportation—the transmission and reconstruction over arbitrary distances of the state of a quantum system—is demonstrated experimentally. During teleportation, an initial photon which carries the polarization that is to be transferred and one of a pair of entangled photons are subjected to a measurement such that the second photon of the entangled pair acquires the polarization of the initial photon. This latter photon can be arbitrarily far away from the initial one. Quantum teleportation will be a critical ingredient for quantum computation networks.

The dream of teleportation is to be able to travel by simply reappearing at some distant location. An object to be teleported can be fully characterized by its properties, which in classical physics can be determined by measurement. To make a copy of that object at a distant location one does not need the original parts and pieces—all that is needed is to send the scanned information so that it can be used for reconstructing the object. But how precisely can this be a true copy of the original? What if these parts and pieces are electrons, atoms and molecules? What happens to their individual quantum properties, which according to the Heisenberg's uncertainty principle cannot be measured with arbitrary precision?

Bennett *et al.*¹ have suggested that it is possible to transfer the quantum state of a particle onto another particle—the process of quantum teleportation—provided one does not get any information about the state in the course of this transformation. This requirement can be fulfilled by using entanglement, the essential feature of quantum mechanics². It describes correlations between quantum systems much stronger than any classical correlation could be.

The possibility of transferring quantum information is one of the cornerstones of the emerging field of quantum communication and quantum computation³. Although there is fast progress in the theoretical description of quantum information processing, the difficulties in handling quantum systems have not allowed an equal advance in the experimental realization of the new proposals. Besides the promising developments of quantum cryptography⁴ (the first provably secure way to send secret messages), we have only recently succeeded in demonstrating the possibility of quantum dense coding⁵, a way to quantum mechanically enhance data compression. The main reason for this slow experimental progress is that, although there exist methods to produce pairs of entangled photons⁶, entanglement has been demonstrated for atoms only very recently⁷ and it has not been possible thus far to produce entangled states of more than two quanta.

Here we report the first experimental verification of quantum teleportation. By producing pairs of entangled photons by the process of parametric down-conversion and using two-photon interferometry for analysing entanglement, we could transfer a quantum property (in our case the polarization state) from one photon to another. The methods developed for this experiment will be of great importance both for exploring the field of quantum communication and for future experiments on the foundations of quantum mechanics.

The problem

To make the problem of transferring quantum information clearer, suppose that Alice has some particle in a certain quantum state $|\psi\rangle$

and she wants Bob, at a distant location, to have a particle in that state. There is certainly the possibility of sending Bob the particle directly. But suppose that the communication channel between Alice and Bob is not good enough to preserve the necessary quantum coherence or suppose that this would take too much time, which could easily be the case if $|\psi\rangle$ is the state of a more complicated or massive object. Then, what strategy can Alice and Bob pursue?

As mentioned above, no measurement that Alice can perform on $|\psi\rangle$ will be sufficient for Bob to reconstruct the state because the state of a quantum system cannot be fully determined by measurements. Quantum systems are so evasive because they can be in a superposition of several states at the same time. A measurement on the quantum system will force it into only one of these states—this is often referred to as the projection postulate. We can illustrate this important quantum feature by taking a single photon, which can be horizontally or vertically polarized, indicated by the states $| \rightarrow \rangle$ and $| \uparrow \rangle$. It can even be polarized in the general superposition of these two states

$$|\psi\rangle = \alpha|\rightarrow\rangle + \beta|\uparrow\rangle \quad (1)$$

where α and β are two complex numbers satisfying $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. To place this example in a more general setting we can replace the states $| \rightarrow \rangle$ and $| \uparrow \rangle$ in equation (1) by $|0\rangle$ and $|1\rangle$, which refer to the states of any two-state quantum system. Superpositions of $|0\rangle$ and $|1\rangle$ are called qubits to signify the new possibilities introduced by quantum physics into information science⁸.

If a photon in state $|\psi\rangle$ passes through a polarizing beamsplitter—a device that reflects (transmits) horizontally (vertically) polarized photons—it will be found in the reflected (transmitted) beam with probability $|\alpha|^2$ ($|\beta|^2$). Then the general state $|\psi\rangle$ has been projected either onto $| \rightarrow \rangle$ or onto $| \uparrow \rangle$ by the action of the measurement. We conclude that the rules of quantum mechanics, in particular the projection postulate, make it impossible for Alice to perform a measurement on $|\psi\rangle$ by which she would obtain all the information necessary to reconstruct the state.

The concept of quantum teleportation

Although the projection postulate in quantum mechanics seems to bring Alice's attempts to provide Bob with the state $|\psi\rangle$ to a halt, it was realised by Bennett *et al.*¹ that precisely this projection postulate enables teleportation of $|\psi\rangle$ from Alice to Bob. During teleportation Alice will destroy the quantum state at hand while Bob receives the quantum state, with neither Alice nor Bob obtaining information about the state $|\psi\rangle$. A key role in the teleportation scheme is played by an entangled ancillary pair of particles which will be initially shared by Alice and Bob.

Figure 1

Voici donc une courte liste de termes dont le bannissement serait libérateur :

- *"Complémentarité"*

Comme on y a déjà fait allusion, la notion bohrienne de complémentarité est une sorte de sauf-conduit qui autorise les résidents du domaine classique à pénétrer dans le monde quantique sans y rencontrer de rédhibitoires difficultés immédiates. Elle permet d'utiliser les concepts classiques d'onde ou de particule, désormais douteux, de façon néanmoins féconde. Mais au cœur du territoire quantique, ces images classiques perdent à proprement parler toute pertinence. Il est certainement trop simpliste d'espérer qu'une réalité nouvelle puisse être pleinement décrite par le recours, aussi ingénieux soit-il, à des idées antérieures et contradictoires. Au surplus, n'oublions pas que la complémentarité, si elle connut son prophète en la personne de Rosenfeld, n'était pas considérée comme une idée si pertinente et convaincante par la plupart des collaborateurs ou successeurs de Bohr, même les plus proches, tels Heisenberg ou Pauli, sans parler de Schrödinger, qui n'hésita pas à écrire, certes tardivement et en privé :

«...that silly and entirely unphilosophical twaddle from Kopenahagen about subject and object and complemenatrity and what not.» [10].

- *"Dualité onde-particule"*

Directement reliée à l'idée de complémentarité, la description des objets quantiques par une "dualité" entre deux aspects classiques est en vérité d'une portée limitée. Si ce point de vue est d'une indéniable utilité lors des premiers contacts avec ces objets étranges, il n'est, et de loin, pas suffisant pour décrire leur nature réelle et rendre compte des subtilités de leur comportement. Il faut certes donner acte de l'intérêt passé de cette idée, qui aida sans doute à la construction historique de la théorie quantique ; mais la pratique moderne de la physique quantique permet une approche plus directe – sans compter que la culture classique fort limitée des étudiants d'aujourd'hui rend assez peu efficace au plan pédagogique l'invocation de la "dualité onde-particule". Les colons australiens, observant un étrange animal dans les cours d'eau de ce continent inconnu, le dénommèrent "taupe-canard" ("duckmole") à cause de sa forme et de sa fourrure taupines et de son bec et de ses pattes palmées canardesques ; mais la "dualité canard-taupo" échoue largement à exprimer la nature originale de l'ornithorynque, qui reçut donc, à juste titre, un nom spécifique (à la vérité, il en portait déjà un dans la langue aborigène, à savoir "mallongong"). Dans la perspective qui est la nôtre aujourd'hui, l'expression "dualité onde-particule" pose une question bien plus qu'elle n'apporte une réponse : comment se fait-il que les objets quantiques apparaissent à l'approximation classique soit comme des ondes, soit comme des particules ? Ou, plus précisément encore, quelles sont les conditions de validité concrètes de ces deux descriptions approximatives – contradictoires et non complémentaires ? Cette question, non-tri-

viale, reste ouverte. En tout état de cause, la "dualité onde-particule" ne résout en rien le problème général de la nature du réel au niveau quantique. Schrödinger encore :

«I believe the problem of "the real world around us" to be much older, much deeper and more difficult to put in order than that old particle-wave duality about which there is at present so much ado, and its palliative – complementarity – which, to be honest, has not yet got beyond the rhetoric stage and, in my opinion, never will.» [15].

• *"Indéterminisme"*

Ici encore, loin d'élucider un problème bien concret, ce terme le masque sous un voile de généralité abstraite. La théorie quantique en elle-même est absolument déterministe, en ce que l'évolution temporelle des états d'un système (isolé) y est gouverné par une équation différentielle sans ambiguïté. La difficulté est que ce déterminisme quantique spécifique est incompatible avec le déterminisme laplacien classique, puisque ce ne sont pas les mêmes grandeurs qui, dans l'un et l'autre cas, se voient ainsi déterminées. C'est donc du point de vue classique, c'est-à-dire de l'extérieur, que la théorie quantique apparaît comme indéterministe, et non quand on la considère de façon intrinsèque. Une fois de plus, le problème-clé est celui de la transition entre ces deux régimes théoriques : au fond, nous comprenons moins bien la physique classique que la physique quantique !

• *"Incertitude (principe de, relations de)"*

Notons tout d'abord qu'il ne s'agit ici en rien d'un principe : les inégalités de Heisenberg, loin de constituer une fondation indépendante de la théorie quantique, sont une simple conséquence de ses véritables principes de base (dans le formalisme hilbertien : représentation des grandeurs physiques par des opérateurs ne commutant pas nécessairement). Mais surtout, l'idée d'"incertitudes" résulte une fois de plus de l'importation illicite d'une notion dans un domaine autre que celui où elle vaut ; il s'agit ici d'une assimilation injustifiée entre la marge d'indéfinition numérique d'une grandeur physique quantique et la marge d'ignorance inévitablement associée à une mesure expérimentale – ce qu'on appelle traditionnellement une incertitude. La confusion résulte en partie des arguments heuristiques de Heisenberg, qui introduisit ses inégalités par l'analyse opérationnelle d'une expérience de pensée – la fameuse expérience du microscope, avant que, rapidement d'ailleurs, on comprenne comment ces inégalités découlaient d'un raisonnement théorique plus formel et plus général [16]. La situation fut encore compliquée par l'imbroglio des hésitations terminologiques et des traductions douteuses : Heisenberg utilisa les mots "Unsicherheit", "Ungenauigkeit" ("incertitude") avant de s'arrêter sur "Unbestimmtheit", soit "indétermination", qui est certainement un meilleur choix, puisqu'il renvoie à l'absence de détermination numérique univoque

d'une grandeur quantique (mais à l'inconvénient d'une dangereuse et trompeuse proximité avec l'"indéterminisme" discuté plus haut). De fait, le terme d'indétermination tint quelque temps le haut du pavé, tant en français qu'en anglais (et reste valide en italien), avant d'être éclipsé [17]. Rien n'illustre mieux le caractère inconvenant de la terminologie hélas dominante, celle d'"incertitude", que la comparaison entre les inégalités ondulatoires classiques et les inégalités de Heisenberg quantiques. Pour un phénomène vibratoire, la largeur de bande du spectre de fréquences, $\Delta\nu$, est liée à sa durée caractéristique Δt par $\Delta\nu \cdot \Delta t > 1$; une simple multiplication par la constante de Planck h conduit à $\Delta E \cdot \Delta t > h$. Comment se fait-il que les "largeurs spectrales", "extensions" ou "dispersions" – nous ne manquons pas de termes appropriés ! [18] – du premier cas, deviennent des "incertitudes" dans le second ? Il y a d'ailleurs une grande ironie à voir le terme "incertitudes" utilisé dans les présentations les plus orthodoxes de la théorie quantique, alors qu'il semblerait beaucoup mieux exprimer les réserves de ses adversaires néoclassiques : si l'on croit en une théorie à variables cachées, selon laquelle l'électron a une position bien déterminée mais inconnue, alors la dispersion de sa position n'est qu'un caractère provisoire et superficiel, dû à notre ignorance – ce serait bien une incertitude.

• "Observables"

Les fondateurs de la physique quantique développèrent une analyse critique de l'expérimentation et de la mesure dans le domaine quantique qui leur fut d'une aide considérable pour se débarrasser de préjugés classiques et construire la nouvelle théorie. Dans cette perspective, l'intérêt porté à l'acte d'observation et à ses limites les conduisit à insister sur le caractère observable ou non des diverses grandeurs physiques. Ainsi le terme d'"observable" en vint-il à se substituer à celui de grandeur, ou de propriété physique. Mais cette terminologie est fort trompeuse puisqu'elle s'applique finalement à toutes les grandeurs formellement définies (représentées par un opérateur hermitien dans le formalisme hilbertien), bien que très peu d'entre elles soient en fait accessibles à l'observation – sans parler du fait que nous manquons, même dans les cas les plus simples de grandeurs effectivement observables (énergie, position), d'une analyse conséquente du complexe processus concret de mesure. La faiblesse épistémologique de ce terme est d'ailleurs mise en pleine lumière lorsqu'on se rappelle comment il fit son apparition. Heisenberg écrivait en 1925, dans le résumé de son article fondateur sur la mécanique des matrices :

«The present paper seeks to establish a basis for theoretical quantum mechanics founded exclusively upon relationships between quantities which in principle are observables» [19] ;

et il poursuivait en excluant de la liste de telles quantités la position même de l'électron – autrement dit, la plus simple et la plus courante des "observables" d'aujourd'hui !

• *"Interprétation"*

On n'a sans doute pas assez remarqué à quel point est étrange la soudaine apparition dans la physique quantique de l'idée selon laquelle la théorie doit être "interprétée". Cette idée n'appartient certainement pas à la tradition classique, celle «de Newton et de Maxwell», où le défi d'une nouvelle théorie était simplement celui de sa compréhension et de son application – et non, celui d'une interprétation, qui, à prendre le terme au sérieux, signifierait la traduction d'une telle théorie dans un autre langage ! En fait, on assiste ici à la manifestation d'un point de vue logico-positiviste, selon lequel le contenu d'une théorie est identique et se réduit à son cadre mathématique ; le formalisme, pris au pied de ses lettres, est alors dépourvu de signification, et exige des règles sémantiques externes pour être mis en correspondance avec les données empiriques. Mais ce point de vue, qui n'était pas celui de Bohr, est fort tardif. En fait, le terme même d'"interprétation" n'est apparu qu'avec l'invention, essentiellement polémique, de l'"interprétation de Copenhague" dans les années cinquante [20] ; il n'appartient en rien au corpus épistémologique originel de la théorie quantique, et ne semble guère avoir fait défaut au cours des intenses débats des années trente.

On ne saurait mieux se convaincre de la pertinence des critiques précédentes, et apprécier la possibilité de se débarrasser d'une terminologie obsolète, qu'en comparant les formulations écrites canoniques de la physique quantique, en particulier dans ses nombreux et fort répétitifs manuels, où abondent les expressions mises en cause, avec la communication orale, dans l'activité de recherche au laboratoire ou dans les colloques spécialisés. Le langage professionnel effectif utilise à la vérité très rarement des termes tels que "complémentarité", "dualité onde-particule", "indéterminisme", "incertitudes" ou "interprétation", ce qui, pour le moins, met en question leur utilité.

b) Semis

Je souhaite ici proposer ou défendre quelques néologismes, avec l'objectif de mettre l'accent sur le caractère intrinsèque et spécifique de la conceptualisation quantique. Pour créer des mots nouveaux, il y a de bonnes raisons de suivre la voie classique de la terminologie scientifique, à savoir le recours à des racines gréco-latines. Bien que cette stratégie se heurte à la tentation du battage publicitaire et de l'écho médiatique, elle a le mérite de ne pas séduire trop rapidement les esprits profanes par l'utilisation de mots concrets faussement intuitifs et de mettre en évidence la difficulté réelle des idées scientifiques nouvelles – je reviendrai sur ce point en conclusion. Un second argument pour ne pas reculer devant l'introduction de termes savants et érudits est qu'ils offrent de meilleures perspectives quant à la compréhension interlinguistique, dans la mesure

où de tels vocables peuvent en général être adaptés (et adoptés) avec des ajustements mineurs en diverses langues, tout au moins dans le domaine indo-européen.

- Commençons par considérer le terme "mécanique quantique" lui-même. Je ne me livrerai pas à une tentative donquichottesque pour mettre en question la référence originelle aux *quanta* latins, bien que l'accent ainsi mis sur les aspects discrets de la théorie soit certainement surfait. Si la discrétisation de l'énergie fut clairement pour Planck et ses contemporains au début du siècle le phénomène le plus évident et le plus révolutionnaire, de Broglie montra vingt ans plus tard que des entités préalablement considérées comme relevant d'une spatialisation discrète (en tant que particule classique) exhibaient également des caractères continus. En fin de compte, la théorie quantique n'est ni plus discrète ni plus continue que la théorie classique ; mais elle montre un jeu plus subtil du discret et du continu, dans la mesure où ces notions s'appliquent désormais aux mêmes entités (quantiques), au lieu de porter sur des entités différentes (ondes *ou* particules classiques). Il n'en serait pas moins superfétatoire désormais de mettre en cause le recours à une caractérisation "quantique" de notre terminologie. Par contre, le terme "mécanique" qui l'accompagne usuellement est certainement beaucoup plus nocif dans la mesure où il défigure une théorie qui n'a plus rien à voir avec les machines (*mechanê*) qui furent à l'origine de la mécanique classique. De plus, la théorie quantique a pour ascendance historique – et pour descendance épistémologique – non seulement la mécanique (classique), mais également la théorie ondulatoire (classique) ; mettre l'accent sur le seul premier aspect ne peut que conduire à une vision distordue. Le plus simple est donc d'abandonner toute connotation mécanique, et de baptiser "**quantique**" cette branche de la physique. La substantivation de l'adjectif est conforme à une procédure très générale, qui a conduit aux termes courants pour les champs de la physique, comme acoustique, thermodynamique, électronique, etc. – sans oublier d'ailleurs la physique elle-même ! Je ne vois guère d'objection à l'utilisation d'un terme aussi simple et naturel, qui d'ailleurs s'est déjà instaurée spontanément chez les étudiants. Cette terminologie permettrait aussi de clarifier le rapport entre "mécanique quantique" et "théorie quantique des champs" (encore obscurci par la prétendue "seconde quantification") ; il suffirait de dénommer la première "quantique galiléenne", et la seconde "quantique einsteinienne". Au surplus, l'adoption du terme "quantique" aurait l'avantage de rendre inutile l'épithète "classique" accolée à "mécanique".

- J'en viens maintenant aux deux idées-clés qui ont émergé récemment – tardivement, peut-on même dire – comme les caractéristiques les plus originales et les plus profondes de la quantique, à savoir "non-localité" et "non-séparabilité" suivant la terminologie actuelle. Le problème réside ici dans la négativité de telles formulations : elles décrivent la quantique par ce qu'elle n'est *pas*, échouant ainsi à la caractériser en tant que telle (*an sich*). Si l'on accepte l'idée que ce monde est quantique, et que sa description classique n'est qu'une approximation (aussi mal comprise soit-elle), alors il semble

approprié de rendre positivement compte de sa nature. C'est là une occasion de mobiliser les ressources traditionnelles du grec et du latin. En lieu et place de "non-localité", je suggère "**pantopie**", propriété d'être en tous (*pan*) lieux (*topoi*) à la fois, terme dont l'étymologie et la construction sont familières (voir utopie, etc.). On pourrait aussi utiliser un terme existant, à savoir "ubiquité", mais je préfère le néologisme "pantopie", car leurs nuances de sens ne sont pas identiques (en botanique, par exemple, l'ubiquité se réfère à la possibilité de trouver une espèce donnée presque partout, impliquant la présence simultanée en divers lieux de différents individus, et non d'un seul). Mentionnons, pour le seul plaisir de la langue, une possibilité encore : outre *ubique* (= partout), le latin dispose d'un autre adverbe avec le même sens général, à savoir *undique* ; le terme "**ondiquité**" aurait alors la signification voulue, tout en contenant un fertile jeu de mots implicite sur les aspects ondulatoires de la quantique.

- Quant au terme "non-séparabilité", outre sa négativité, il a l'inconvénient d'être trop et trompeusement concret, puisque la séparation, dans la langue courante, concerne l'espace ordinaire, alors qu'il s'agit ici, dans le domaine quantique, de l'espace abstrait des états (espace de Hilbert). La "non-séparabilité" ne fait qu'exprimer le fait élémentaire mais non-intuitif qu'un produit tensoriel d'espaces vectoriels déborde largement l'ensemble des vecteurs produits tensoriels qui l'engendrent. Un vecteur quelconque n'est pas factorisable, et se présente dans une base quelconque comme une somme de produits tensoriels – autrement dit, comme une superposition "non-séparée" d'états corrélés. La première caractérisation verbale de cette situation est due à Schrödinger qui introduisit le terme "Verschränkung" pour la décrire ; c'est le terme "entanglement" en anglais qui s'est imposé récemment, bien que ses connotations soient assez différentes. Un néologisme plus abstrait et plus universel semble approprié ici. La notion de repliement, intrication, enchevêtrement, etc., est rendue en grec par le mot *emplexis*, du verbe *plekô*. Il est donc naturel d'avancer, pour remplacer "non-séparabilité", le terme d'"**implexité**" qui a le double avantage de rendre hommage à la notion d'"ordre implicite" proposée par David Bohm, et de trouver place dans une longue et familière série de mots, comme complexité et perplexité (qui, à leur manière, caractérisent d'ailleurs aussi le contexte quantique...). On pourrait alors remplacer "enchevêtrement" ("Verschränkung", "entanglement"), par "**implexion**", et, au lieu d'un "état enchevêtré" parler d'un "état **implexé**".

- Un dernier exemple de l'intérêt d'une réforme terminologique peut être trouvé dans le traitement des entités quantiques identiques. Notons tout d'abord qu'elles sont en général caractérisées comme "indiscernables", ce qui est un terme purement opérationnel, et, comme tel, sujet aux mêmes critiques que celles adressées plus haut au terme d'"observables". C'est bien l'identité objective présumée des objets qui est en jeu ici, et non pas seulement notre incapacité à les distinguer. Leur comportement collectif est couramment décrit en terme d'une "statistique" (de Fermi-Dirac ou de Bose-Einstein), même quand le système considéré ne comprend qu'un petit nombre d'objets, et que des

considérations statistiques proprement dites n'ont aucune pertinence. D'ailleurs, les propriétés statistiques, valables pour des ensembles nombreux, sont en fait la conséquence d'une caractéristique plus profonde et spécifiquement quantique, qui se manifeste dès que deux objets identiques forment système, et que l'on considère la façon dont se transforme par permutation leur état collectif. Pourquoi donc ne pas utiliser le terme spécifique de "**permutabilité**" (ou, plus court mais moins naturel peut-être, de "**permutance**") ?

c) *Tuteurage*

Quel que soit l'impact de la création délibérée de nouveaux termes pour la quantique, et le sort qui leur sera réservé, on peut déjà saluer l'apparition plus ou moins spontanée d'innovations terminologiques, dont l'usage semble se répandre – et aider à leur diffusion. Trois exemples me suffiront pour conforter l'argumentation développée ici.

- Dans la critique ci-dessus de la "dualité onde-particule", j'ai insisté sur le caractère classique de ce dualisme, supplanté par un monisme quantique. Une entité quantique n'est *ni* une onde, *ni* une particule, de sorte qu'il semble s'imposer de donner une appellation générique à tous ces objets, qui, selon Feynman, «sont dingues, mais tous de la même manière» : protons, électrons, photons (ces derniers, d'ailleurs, baptisés par Lewis en 1926, bien après leur conception par Einstein – voilà au moins un exemple de néologisme à succès !), positrons (préférable à "positons", soit dit en passant), phonons, rotons, gluons, etc. L'acceptation généralisée et la fécondité du suffixe "-on" pour dénommer les entités quantiques spécifiques rend parfaitement naturelle la proposition, avancée par Bunge voici quelques décennies, de les rassembler sous le terme commun de "**quantons**", qui fait dans la littérature spécialisée une progression lente mais continue [21]. Notons d'ailleurs que l'usage absolument courant des termes (non-classiques !) de "fermions" et "bosons" pour dénommer les deux catégories d'objets quantiques (selon leur "permutabilité" – voir ci-dessus) ne fait que rendre plus criante le manque d'un terme commun pour ces objets.

- Dans la même veine, on peut se féliciter de l'avènement des "**qubits**" de la théorie quantique de la communication (faudrait-il aller jusqu'à parler de "quommunication" ?) ; après tout, cette idée n'est que la reprise de l'ancienne et sans doute trop négligée aujourd'hui terminologie de Dirac, qui, par opposition aux grandeurs classiques ou "c-nombres", dénommait "q-nombres" les grandeurs quantiques, ce qui est certainement préférable à "observables".

- Enfin, l'une des meilleures créations terminologiques récentes est certainement le vocable "**décohérence**", dont il faut noter qu'il est construit à l'exact inverse des termes "non-séparabilité" et "non-localité" : en l'occurrence, un processus conduisant de la conceptualisation quantique à la classique, est à juste titre caractérisé par la négation de la première.

La figure 2 résume l'ensemble de ces propositions.

Pour bien parler le quantique	
Ne dites pas :	Dites :
complémentarité	—> —
dualité onde-particule	—> —
indéterminisme	—> —
interprétation	—> —
Principe d'incertitude	—> inégalités de Heisenberg
incertitudes	—> extensions, largeurs spectrales
observables (quantiques)	—> propriétés, grandeurs
mécanique quantique	—> quantique
particules	—> quanta
non-localité	—> pantopie
non-séparabilité	—> implexité
enchevêtrement, enchevêtré	—> implexion, implexé
statistique	—> permutabilité, permittance

Figure 2

MOTS POUR MAUX

Pour éviter tout malentendu, il me faut préciser que je ne crois en rien à la possibilité d'une terminologie "scientifiquement pure" et "épistémologiquement correcte", qui réglerait une fois pour toutes la question des mots. Bien au contraire, il s'agit ici de reconnaître l'inéluctable historicité et la contextualité culturelle de nos formulations, aussi scientifiques soient-elles, de façon à pouvoir les transformer. On n'épuise pas plus les significations d'un concept que les Danaïdes ne peuvent vider leur tonneau.

Mais je tiens qu'un réexamen critique permanent de notre vocabulaire, conduisant à l'élimination de termes obsolètes et à l'introduction de nouveaux vocables, peuvent nous aider à mieux maîtriser nos concepts. Je trouve regrettable que tant d'expériences

si subtiles continuent à être décrites en des termes qui ne rendent pas justice à leur originalité [22]. C'est aussi en termes directement didactiques que peut être justifiée la refonte terminologique. De fait, plusieurs des propositions avancées ici trouvent leur origine dans l'expérience pédagogique, et ont été mises à l'épreuve avec succès sur ce terrain d'essai [23].

Mais notre responsabilité de physiciens dépasse nos seules tâches professionnelles, qu'il s'agisse de recherche ou d'enseignement. On s'accorde à reconnaître aujourd'hui que l'intérêt bien compris de l'entreprise scientifique exige que ses protagonistes partagent leur savoir avec les profanes. Mais comment pouvons-nous espérer faire correctement comprendre les concepts délicats et les expériences ingénieuses que nous élaborons si nous sommes désinvoltes dans leur formulation au point de ne pas les comprendre véritablement nous-mêmes ? Contrairement à des attentes (ou des craintes) naïves, le recours à un langage exigeant, pourvu qu'il soit sérieusement construit et expliqué, ne s'oppose nullement à l'effort de développement d'une meilleure compréhension publique de la science. À l'inverse, en aidant à mettre en évidence la spécificité et l'originalité des concepts scientifiques et leur différence d'avec les notions communes, cette exigence linguistique va dans la bonne direction. Ce n'est pas en brouillant la distinction entre connaissance commune et savoir scientifique, et en prétendant établir une artificielle transition continue, mais bien en exposant le hiatus qui les sépare et en montrant ses largeurs et profondeurs réelles, que l'on peut mener une vulgarisation efficace.

En tout état de cause, tant que les physiciens feront preuve de tant d'irresponsabilité dans leur rapport à la langue, ils n'auront guère de droit à critiquer et mépriser ceux qui, dans d'autres champs, scientifiques ou non, prennent leurs énoncés d'une façon simpliste ou naïve ; n'oublions pas la parabole de la paille et de la poutre. Je fais allusion ici à l'"affaire Sokal" et aux débats qu'elle a suscités [24]. Par-delà les détails de cet épisode, il ne s'agit au fond de rien moins que de la place de la science dans la culture contemporaine.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jean-Marc LÉVY-LEBLOND, "La langue tire la science" in *La pierre de touche*, Gallimard, Paris 1996, pp. 228-251.
- [2] Niels BOHR, in P. A. Schilpp (Ed.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, The Library of Living Philosophers, Evanston 1949, pp. 200-241.
- [3] Niels BOHR, d'après Petersen (1968), in J. A. Wheeler & W. H. Zurek (Eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, p. 7.

- [4] Niels BOHR, "Physical Science and the Study of Religions", *Studia Orientalia Ioanni Pedersen septuagenario A.D. VII id. Nov. Anno MCMLIII*, Ginar Mimlesgaard, Copenhagen 1953, pp. 385-390.
- [5] T. BERGSTEIN, *Quantum Physics and Ordinary Language*, London: Macmillan 1972.
- [6] Voir les souvenirs de Paul Langevin, in "La notion de corpuscule et d'atome", *Actualités scientifiques*, Hermann, Paris 1934, pp. 44-46.
- [7] James Clerk MAXWELL, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", *Phil. Trans. R. Soc.* 155, 1865, pp. 459-512.
- [8] John Hendry, *James Clerk Maxwell and the Theory of the Electromagnetic Field*, Adam Hilger, 1986.
- [9] «Les mots (...) ne présentent pas la seule idée de l'objet signifié, mais aussi un nombre plus ou moins grand d'images incidentes. C'est la haute valeur de la langue que d'être ainsi faite de mots. Les vocables scientifiques ne présentent que l'idée nue et limitée de tel ou tel objet : ce sont bien des termes, car ils déterminent et définissent la chose de toutes parts.» Giacomo Leopardi, *Zibaldone* (30 avril 1920), in *Opere scelte*, Rizzoli, Milano 1937, vol. 3, pp. 102-103.
- [10] Catherine CHEVALLEY, notes et commentaires in Niels Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Gallimard, Paris 1991 ; voir en particulier pp. 480-502.
- [11] Le rôle de "sauvegarde" joué par la "complémentarité" et sa relation avec la question des limites du langage ordinaire ont été analysés par Catherine Chevalley, "Complémentarité et langage dans l'interprétation de Copenhague", *Rev. Hist. Sci.* XXXVIII-3/4, 1985, pp. 251-292.
- [12] On peut se couvrir, quant à ces réserves, derrière une autorité incontestée : «I know that it is not N. B.'s fault, he has just not found the time to study philosophy. But I deeply deplore that by his authority the brains of one or two or three generations will be upset and prevented from thinking about problems that 'He' pretends to have solved.» Erwin Schrödinger, lettre à Léon Brillouin, Bozen, 6 novembre 1959, American Institute of Physics (Niels Bohr Library-Brillouin Archives), New York, inédit, aimablement communiqué par Rémi Mossseri.
- [13] Voir le récemment publié "manuscrit de 1942" : Werner Heisenberg, *Ordnung der Wirklichkeit*, Munich: Piper 1989. La question est discutée par Catherine Chevalley dans la présentation de sa traduction française, Werner Heisenberg, *Philosophie, Le manuscrit de 1942*, Seuil, Paris 1998, pp. 153-187.
- [14] Il vaut la peine de se souvenir que de telles possibilités, non seulement n'avaient pas été prévues par les fondateurs de la physique quantique, mais que de telles facultés avaient même été déclarées hors d'atteinte par principe.

- [15] Erwin SCHRÖDINGER, lettre à Léon Brillouin, Bozen, 16 octobre 1959, American Institute of Physics (Niels-Bohr Library-Brillouin Archives), New York, inédit, aimablement communiqué par Rémi Mosseri.
- [16] Une telle démonstration générale fut donnée par Roberston dès 1929, c'est-à-dire deux ans à peine après l'article-clé de Heisenberg : H. P. Robertson, "The Uncertainty Principle", *Physical Review* 34, 1929, pp. 163-164. Il est intéressant de remarquer que, comme cela allait être souvent le cas par la suite, le titre ni la terminologie de cet article ne reflètent son contenu.
- [17] Jean-Marc LÉVY-LEBLOND & Françoise BALIBAR, "When did the indeterminacy principle become the uncertainty principle? (Answer to Query #62)", *American Journal of Physics*, 66, 1998, pp. 278-279.
- [18] Par exemple, Schrödinger, dans son article fondamental de 1935, bien que mentionnant le «Heisenberg Ungenauigkeitsbeziehung», dénomme «Toleranz- oder Variationsbreiten» (largeurs de tolérance ou de variation) les quantités mises en jeu : Erwin Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik", *Die Naturwissenschaften* 1935, pp. 807-812, 823-828, 844-849.
- [19] Werner HEISENBERG, *Zeitschrift für Physik* 33, 1925, pp. 879-, traduction anglaise dans B. L. Van der Waerden (Ed.), *Sources of Quantum Mechanics*, North-Holland, Amsterdam 1967.
- [20] Voir la contribution de Catherine CHEVALLEY au colloque *Epistemological & Experimental Perspectives on Quantum Physics* (Institute Vienna Circle, Vienne, septembre 1998), "Why do we find Bohr obscure?".
- [21] Voir Jean-Marc LÉVY-LEBLOND, "Classical Apples and Quantum Potatoes", *Eur. J. Phys.* 2, 1981, pp. 44-, et "Neither Waves, nor Particles, but Quantons", *Nature* 334, 1988, p. 6177.
- [22] Pour un exemple récent, voir S. DÜRR, T. NONN & G. REMP, "Origin of Quantum-mechanical Complementarity probed by a 'which-way' Experiment in an Atom Interferometer", *Nature* 395, 1998, pp. 33-37. Dans cet article, toute la discussion épistémologique d'une très belle expérience est gâchée par une prétendue opposition entre deux termes aussi inappropriés l'un que l'autre, à savoir "complémentarité" et "incertitude".
- [23] Le manuel de Jean-Marc LÉVY-LEBLOND & Françoise BALIBAR, *Quantique* (t.1, *Rudiments*), Interéditions/CNRS, Paris 1984, et Masson, Paris 1996, met en pratique certaines de ces recommandations.
- [24] Pour une analyse critique collective, voir B. Jurdant ed., *Impostures scientifiques*, La Découverte, Paris 1996 et *Alliage* n° 35-36, Anais, Nice 1998.