

LE CONCEPT DE REALITE EN PHYSIQUE : UNE ETUDE EPISTEMOLOGIQUE

Mustapha Oldache^{(1,*),} Chams-Eddine Khiari⁽²⁾ et Tayeb Belarbi⁽³⁾

^(1,2) Dpt. Physique, Laboratoire de Didactique des Sciences, ENS-Kouba, B.P. 92, 16050 Kouba

⁽³⁾ Département de Psychologie et des Sciences de l'Education, Université d'Alger 2, 16006 Bouzaréah

(Reçu le 13 Novembre 2014 ; accepté le 24 Janvier 2015 ; publié en ligne le 12 Février 2015)

RÉSUMÉ :

Les objets étudiés par la physique classique sont supposés exister indépendamment de l'observateur. De plus, la description de leurs mouvements ou de leurs états dans un cadre spatio-temporel est tenue pour être exhaustive. En mécanique quantique, par contre, toute mesure effectuée sur un système physique perturbe inévitablement celui-ci. Par conséquent, la matière, la lumière et leurs interactions ne peuvent être décrites par un aspect unique, soit corpusculaire, soit ondulatoire. Et, enfin, l'expérience d'Aspect semble mettre en évidence l'existence d'une non-localité quantique. Tous ces effets concourent pour révéler une « réalité quantique » radicalement différente de la réalité physique classique. On propose ici une analyse épistémologique d'une telle réalité quantique.

MOTS-CLÉS : Mécanique quantique, principe d'indétermination, intrication quantique, réalité physique, expérience d'Aspect, logique du tiers-inclus.

I. INTRODUCTION

Le problème de la « réalité » a été soulevé par la philosophie depuis très longtemps alors qu'il ne s'est posé en physique que relativement récemment. Ce problème ne se pose pratiquement pas en physique classique puisque les objets que celle-ci « manipule » sont supposés réels : masses, ressorts, pendules, planètes, satellites... Le problème a commencé à se poser par l'introduction du concept « champ », utilisé initialement pour éviter de faire appel aux actions à distance. Mais le problème s'est surtout posé, avec l'avènement de la mécanique quantique, par l'introduction du concept de « fonction d'onde » et du principe d'indétermination. Selon Schrödinger [1], les particules n'existent pas en tant que corps matériels mais seules existeraient, d'après lui, les ondes de matière. Puis l'Ecole de Copenhague ôta à la fonction d'onde toute signification physique pour lui conférer le statut de simple « outil mathématique » servant à évaluer les probabilités d'occurrence des différents résultats de mesure. En mécanique quantique relativiste, les particules ne sont que des excitations des champs quantiques. De même, en relativité générale, les masses sont assimilées à des « singularités » du champ gravitationnel. Aussi, est-il légitime de se poser la question : mais alors, dans ce cas, qu'est-ce qui existe effectivement ?

II. OU SE SITUE LA REALITE ?

En langage courant, le mot « réalité » désigne ce qui existe effectivement, par opposition à l'imaginaire. Le mot « réalité » provient du latin « res » qui signifie « chose ». Guéron [2] a défini le corps matériel par « *Un corps est une forme matérielle vivant dans l'espace et*

dans le temps ». Selon Kastler [3], la chose (ou objet) possède deux propriétés fondamentales : la permanence et l'individualité. Mais il est évident que la permanence est relative puisque la glace est susceptible de fondre, les corps combustibles se transforment en fumée lorsqu'ils brûlent, les molécules se font et se défont lors des réactions chimiques, les atomes radioactifs se désintègrent et les particules elles-mêmes peuvent être créées et annihilées lors des réactions nucléaires.

L'individualité aussi est relative puisque l'existence des différentes interactions fait que d'une part, il n'existe pas de particule ou de système isolés et que, d'autre part, l'appariement assemble les particules par couples. De manière encore plus fondamentale, la non-séparabilité quantique est aujourd'hui un fait bien établi. Puisque le changement est un fait incontournable dans la nature, on est alors amené à chercher la réalité, non pas dans les choses, les êtres et les phénomènes en soi mais dans les entités invariantes. La physique classique repose, en effet, sur des principes de conservation : conservation de l'énergie, de la masse, de l'impulsion, du moment cinétique, etc. On est alors tenté de tenir ces principes de conservation comme étant la réalité profonde.

Mais le théorème de Noether [4] spécifie qu'à chaque conservation d'une entité physique correspond une symétrie. Ce qui veut dire que l'entité considérée est invariante vis-à-vis de la symétrie correspondante (voir tableau 1). On est amené, dans ces conditions, à situer la réalité profonde, non pas au niveau principes de conservation des grandeurs physiques, mais au niveau des symétries correspondantes (en particulier, les symétries de l'espace-temps).

(*)Auteur correspondant, musoldache@gmail.com

Tableau 1 : Mise en correspondance de la conservation des entités physiques avec les symétries.

Entité physique (ou transformation) conservée	Symétrie correspondante
Impulsion	Symétries liées aux translations dans l'espace
Energie	Symétries liées aux translations dans le temps
Moment cinétique orbital	Symétries liées aux rotations dans l'espace physique
Spin	Symétries liées aux rotations dans l'espace du spin
Intervalle d'espace-temps	Symétries liées aux transformations du groupe de Poincaré
Parité	Symétries liées au changement de parité
Permutation de particules identiques	Symétries liées aux permutations de particules
Transformation d'une particule en son antiparticule	Symétrie de conjugaison de charge
Changement de couleur	Symétries liées aux générateurs de couleur
Changement d'un lepton en son neutrino	Symétries liées aux générateurs d'isospin faible

III. REALITE INDEPENDANTE ET REALITE EMPIRIQUE

Certains philosophes ont fait remarquer que si la réalité indépendante (ou objective) existait, elle serait inconnaissable. Aussi faut-il, selon eux, se contenter de la réalité empirique, i.e. l'ensemble des phénomènes qui nous sont accessibles par nos sens et nos moyens d'investigation. Il est utile cependant, afin de faire la part des choses, d'introduire deux notions de réalité :

- La réalité indépendante qui serait une réalité extérieure à la conscience et indépendante d'elle.
- La réalité empirique qui est révélée par les phénomènes.

On a indiqué ci-haut que le mot réalité provient du latin « *res* » qui signifie objet et on a donné une définition de l'objet comme un être matériel, doué d'une forme et existant dans un cadre spatio-temporel. Il est bien entendu que cette définition concerne uniquement les objets physiques (i.e. les objets relevant de la réalité empirique et que nous tenons pour « concrets »). Lecomte [5] distingue en fait quatre catégories d'objets :

- Les objets formels.
- Les objets auxquels sont associés les concepts physiques.
- Les objets de la réalité indépendante.
- Les objets de nature biologique.

Les objets formels sont liés à l'existence d'une conscience humaine. Ils sont les images d'une certaine opération de pensée et d'un fonctionnement rigoureux de l'esprit humain. On peut citer comme exemple les objets mathématiques. Les objets auxquels sont associés les concepts physiques sont produits pour décrire les phénomènes et servent à mettre en association des objets formels avec des propriétés physiques. On peut citer comme exemple les constantes universelles qui expriment, selon Cohen-Tannoudji [6], les limitations humaines dans leur rapport avec la réalité indépendante. Les objets de la réalité indépendante, eux, ne sont pas connaissables. Ils ne sont pas forcément individualisables et échappent à la procédure de catégorisation qui semble nécessaire à tout processus de la connaissance humaine. Les objets de nature biologique, enfin, appartiennent à la réalité indépendante. Leur catégorisation, leur individualisation et leur séparation sont des opérations mentales qui ne traduisent pas forcément des propriétés intrinsèques de ces objets.

Ainsi, la réalité indépendante est inconnaissable rationnellement. Seule la réalité empirique est connaissable et elle se révèle à nous à travers les phénomènes que nous pouvons percevoir. Ces phénomènes se caractérisent par des régularités, ce qui légitime le fait de leur attribuer des causes et de stipuler l'existence de « *lois de la nature* » et de « *principes généraux de la physique* », en particulier

les principes de conservation des grandeurs physiques telles que l'énergie, l'impulsion, le moment cinétique, etc. Selon Charon [7], la réalité est continue et c'est la connaissance que nous en

avons qui est discontinue : « *Ce que nous appelons 'réalité' est une recreation par notre esprit d'une réalité dont nous apercevons des effets approximatifs et discontinus* ».

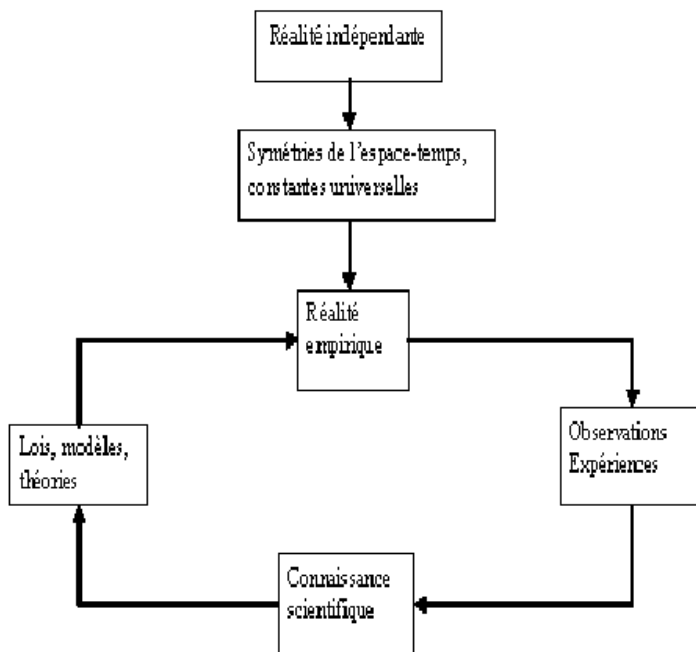


Figure 1 : Rapports entre la réalité et la connaissance scientifique

Cette discontinuité de la connaissance de l'univers se traduit par l'existence des constantes universelles h , c , e ... Cela veut dire que la réalité indépendante est indivisible et que c'est la connaissance que nous en avons (i.e. la réalité empirique) qui est fragmentaire. A partir de ces connaissances fragmentaires acquises par les observations et les expériences, le physicien fait une généralisation (en élaborant des lois, des théories ou des modèles) afin de représenter la réalité et de lui donner une certaine cohérence (voir figure1). La question qui se pose toutefois est : « *La réalité indépendante de l'observateur existe-t-elle ?* ». Les physiciens se classent, vis-à-vis de cette question en « réalistes » et « empiristes ». Parmi la première catégorie, on peut citer Einstein qui croyait à l'existence d'une réalité profonde se cachant derrière les phénomènes. Il compara ainsi l'univers à une horloge dont on peut lire l'heure mais sans pouvoir accéder au mécanisme. D'où sa déclaration [8] : « *les régularités observés dans les phénomènes ont leur origine dans une réalité physique dont l'existence est indépendante des observateurs humains* ». On peut illustrer la seconde catégorie par la citation suivante : « *Une réalité c'est une réalité vue par l'homme* » (Heisenberg [9]). Ainsi, le réalisme est une vue objective de la nature tandis que l'empirisme est une vue subjective. Mais on peut poser la question : la physique est-elle objective ou subjective ? Bohr répondit à cette question par : « *Bien sûr qu'elle est objective puisque ses énoncés sont valables pour n'importe qui* ». D'Espagnat [10]

distingue en fait deux types de réalisme : le réalisme fort (ou proche) et le réalisme faible (ou lointain).

- Le réalisme proche est une vision du monde selon laquelle tous les éléments de la réalité sont supposés décrits adéquatement par des notions qui nous sont proches et familières (exemple : la mécanique newtonienne)

- Le réalisme lointain est une vision du monde selon laquelle le monde n'est pas descriptible en termes de concepts familiers mais seulement par des représentations mathématiques abstraites comme, par exemple, la mécanique quantique et la relativité.

Il faut noter cependant que le fait que la réalité indépendante ne peut pas être connue n'implique pas qu'elle n'existe pas. Il y a lieu de faire une différence entre le principe qui veut que : « *Ce que je ne connais pas n'existe pas* » et celui selon lequel : « *Ce que je ne connais pas, j'ai l'obligation de n'en pas parler* ».

IV. LOGIQUE DU TIERS INCLUS ET NIVEAUX DE REALITE

La logique du contradictoire introduite par Bohr en physique a amené certains auteurs à remplacer la logique d'Aristote ou logique du tiers-exclu par une autre logique. On sait que la logique d'Aristote (dite encore « logique du tiers-exclu ») repose sur trois axiomes :

i) L'axiome d'identité : A est A .

ii) L'axiome de non-contradiction : A n'est pas **non - A**.

iii) L'axiome du tiers exclu : il n'existe pas un troisième terme qui serait à la fois **A** et **non-A**.

Selon cette logique, une proposition **A** est soit vraie, soit fausse. Si elle est vraie, alors son contraire est faux et vice-versa. Il est impossible qu'une proposition et son contraire soient tous les deux vrais ou tous les deux faux. Cette logique est binaire puisqu'elle repose sur deux valeurs logiques possibles : vrai ou faux (voir tableau 2). Lupasco [11], raisonnant non sur des propositions mais sur des événements, a introduit la logique du tiers-inclus. Un événement donné, selon lui, peut être soit actualisé, soit potentialisé (ce qui ne veut pas dire qu'il disparaît complètement). Quand un événement est actualisé, son antagoniste (ou contraire) est potentialisé et inversement. Cette logique est dynamique, en ce sens où, au lieu de raisonner sur des états, elle conçoit un dynamisme des différentes

possibilités. Ainsi, en plus des configurations (**e A, non-e P**) [correspondant à **e** actualisé et **non-e** potentialisé] et (**e P, non-e A**) [correspondant à **e** potentialisé et **non-e** actualisé], il existe un troisième état **T** (dit tiers-inclus) représentant un état intermédiaire entre les deux précédentes (voir tableau 3). Bararab [12], appliquant cette logique à la mécanique quantique a déduit qu'affirmer que l'électron ou le photon sont en même temps des particules et des ondes n'est plus contradictoire selon cette logique. Si, en effet, l'aspect corpusculaire est actualisé (lors d'une expérience), alors l'aspect ondulatoire est potentialisé et vice-versa. Par ailleurs, les observations et analyses scientifiques ont révélé que la nature présentait des aspects différents suivant l'angle ou l'échelle ou le domaine dans lesquels on l'étudie. Il est devenu évident, par exemple, que le monde microscopique obéit à des lois différentes de celles du monde macroscopique.

Tableau 2 : Les valeurs d'une proposition **A** et de son contraire dans la logique du tiers-exclu

A	Vrai	Faux
Non-A	Faux	Vrai

De même, le vivant semble obéir à une logique différente de celle de l'inerte puisqu'il a nécessité de faire appel à la notion de téléonomie (au lieu et place de la notion de causalité) et qu'il semble défier le principe de croissance de l'entropie stipulé par le deuxième principe de la thermodynamique. Et enfin, les phénomènes psychiques se sont révélés irréductibles à tout physicalisme. Mentionnons aussi la théorie de la relativité d'échelle introduite en astrophysique par Nottale [13]. Cette théorie, qui

stipule que l'univers est structuré différemment selon l'échelle considérée, est même perçue comme étant un candidat possible parmi les tentatives d'unification des interactions fondamentales. Ces considérations font qu'il serait vain de réduire la réalité à un niveau unique mais qu'il est plus judicieux de distinguer plusieurs niveaux de réalité, possédant chacun d'eux sa propre « logique » et ses propres lois de causalité.

Tableau 3 : Les valeurs possibles d'un événement dans la logique du tiers-inclus

e	A	P	T
Non-e	P	A	T

Dans la figure 2, les valeurs de la logique du tiers-inclus sont représentées par un triangle où les états **e** et **non-e** se situent aux sommets d'une base (qui représente un niveau de réalité) et l'état **T** au troisième sommet (représentant le niveau de réalité immédiatement supérieur). Dans cette perspective, **e** et **non-e** ne sont contradictoires (i.e. s'excluent l'un

l'autre) que si on se place au niveau de réalité où ils se situent. C'est donc la projection de **T** sur ce niveau qui engendre la contradiction. Le fait de prendre en considération les deux niveaux de réalité fait disparaître la contradiction. Dans cet ordre d'idées, Lupasco [14] a généralisé le concept « matière » en introduisant la notion des « trois matières » :

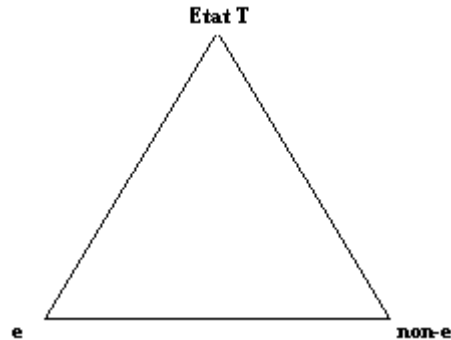


Figure 2 : Logique du tiers-inclus et niveaux de réalité

- La matière physique : c'est une matière inerte dominée par l'homogénéité et l'entropie.
- La matière biologique : c'est une matière vivante dominée par l'hétérogénéité et la néguentropie.
- La matière psychique, caractérisée par un équilibre antagoniste entre l'homogénéité et l'hétérogénéité.

Les considérations précédentes laissent supposer que la réalité ne se situe pas à un niveau unique mais à plusieurs niveaux. Deux faits qui sont jugés « *contradictoire*s » à un niveau de réalité donné peuvent être réconciliés si on passe à un niveau supérieur. Cette manière de voir permet de dépasser le réductionnisme en tenant compte du fait que les lois gouvernant la nature diffèrent d'un niveau de réalité à l'autre et ce, en accord avec la théorie de l'émergence selon laquelle « *les grandes lois physiques ne peuvent pas être déduites de principes plus fondamentaux* » [15]. Elle permet aussi de dépasser la logique du tiers-exclu (qui est une logique statique et dont les éléments sont des propositions) au profit d'une logique du tiers-inclus (qui est une logique dynamique et dont les éléments sont des événements).

V. EXISTE-T-IL UNE REALITE QUANTIQUE ?

L'avènement de la physique quantique s'est caractérisé dès le début par une polémique entre les physiciens réalistes (Einstein, Schrödinger, de Broglie,...) et les physiciens empiristes (Bohr, Heisenberg, Dirac,...). Dans son modèle de l'atome de l'hydrogène, Bohr [16] a été amené à supposer l'existence d'états quantifiés et que l'électron peut sauter d'un état à un autre par des sauts discontinus et acausaux. Ceci l'amena à déclarer : « *Nous sommes obligés de renoncer à une description causale et spatio-temporelle des phénomènes atomiques* ». Il systématisa ses idées en énonçant le principe de complémentarité selon lequel la réalité quantique ne peut être épuisée par une représentation unique. Selon lui, une dualité de représentations, contradictoires mais complémentaires, est nécessaire. D'après l'Ecole de Copenhague, la réalité est purement empirique. C'est ce qu'exprima Rosenfeld [17] par : « *C'est*

maintenant le tout indivisible formé par le système et les instruments d'observation qui définit le phénomène ». En conséquence, la particule n'a pas de propriétés propres telles que la position, la vitesse, le spin, etc. mais c'est le processus de mesure qui lui confère ces propriétés.

V.1 Paradoxe EPR et théorème de Bell

Les contradictions de la mécanique quantique sont dues au fait qu'on exige de la particule qu'elle possède à chaque instant des propriétés bien définies. Le courant réaliste (Planck, Einstein, Schrödinger,...) a tenté de mettre en défaut l'Ecole de Copenhague. Ainsi, Schrödinger imagina l'expérience de pensée dénommée « *le chat de Schrödinger* » afin de démontrer « l'absurdité » de l'interprétation de Copenhague. Pour Einstein, la mécanique quantique est incomplète, en ce sens que sa description de la réalité n'est pas exhaustive. Il postula l'existence de « *paramètres cachés* » qui, si on les connaissait, rétabliraient le déterminisme en microphysique. Il conçut en 1935, avec ses collaborateurs Podolsky et Rosen, l'expérience de pensée EPR afin d'appuyer ce point de vue. Les auteurs de l'argument EPR commencèrent par émettre des critères qui doivent caractériser toute théorie physique [18] :

- i) Chaque élément de la réalité physique doit avoir sa contrepartie dans une théorie complète.
- ii) Si le système n'est perturbé d'aucune manière et qu'on peut prédire exactement la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de la réalité qui correspond à cette quantité physique.

Après la formulation du raisonnement EPR, il fallut concevoir une expérience qui donnerait des résultats soit en faveur de la mécanique quantique, soit en faveur de la théorie des variables cachées. Bell [19] introduisit effectivement en 1966 un théorème permettant de départager les deux théories. Selon ce théorème, les prévisions de la théorie des variables cachées coïncident avec ceux de la mécanique quantique seulement pour certaines orientations de l'appareil de mesure (i.e. le dispositif permettant de mesurer soit la polarisation d'un photon, soit le spin d'une particule) mais

qu'un écart important entre les deux théories apparaît pour d'autres orientations. La question qui se pose est : quelle est la théorie qui rend compte des phénomènes au mieux ? Est-ce la mécanique quantique ou la théorie des variables cachées ? La réponse à cette question était justement le but de l'expérience d'Aspect.

V.2 L'expérience d'Aspect

La technologie de l'époque où Einstein, Podolsky et Rosen avaient imaginé l'expérience de pensée EPR ne permettait pas de réaliser l'expérience effectivement. Il en est même pour l'époque où Bell démontra son théorème. En effet, l'expérience, très délicate à réaliser, ne fut menée avec succès qu'après bien des tentatives, Clauser et al. [20] démontrèrent la faisabilité de l'expérience en 1969, puis des équipes des universités américaines de Harvard et Berkeley effectuèrent en 1972 des expériences qui donnèrent des résultats contradictoires. L'université de Harvard trouva que le théorème de Bell était satisfait alors que l'université de Berkeley trouva qu'il était violé. L'université de Houston fit sa propre expérience et confirma le résultat de Berkeley. Les expériences décisives furent menées par l'équipe d'Aspect [21] de l'Institut d'Optique Théorique et Appliquée d'Orsay entre 1980 et 1982. L'expérience de 1982 fut celle qui se rapprochait le plus des conditions idéales pour tester le théorème de Bell.

Le résultat de l'expérience fut que les inégalités de Bell étaient violées. C'était la preuve que les prévisions de la mécanique quantique étaient en parfait accord avec l'expérience alors que celles des théories à variables cachées locales étaient infirmées. Par la même occasion, l'existence d'une non-localité quantique était prouvée expérimentalement. D'autres expériences ont été réalisées après celles de l'équipe d'Aspect. Ainsi, une expérience a été réalisée à Genève en 1998 avec des détecteurs distants de 30 km, en utilisant le réseau suisse de télécommunication par fibres optiques et en mesurant le temps avec une horloge atomique. Cette expérience confirma les résultats de l'expérience de l'équipe d'Orsay avec une précision accrue.

VI. CONCLUSION

Le problème de la réalité est un problème de fond en mécanique quantique. Les différentes interprétations de cette théorie physique soulèvent la question de savoir si la fonction d'onde est une vraie onde physique ou si elle n'est qu'un outil mathématique servant à décrire les états quantiques et à prévoir les résultats des mesures. La question de la dualité de la matière et de la lumière ainsi que les phénomènes d'interférence et d'intrication révèlent une « réalité quantique » très différente de la réalité classique. Le problème de savoir si la mécanique quantique est une théorie complète ou

si'il existe des « paramètres cachés » demeure posé. L'expérience d'Aspect a montré que les prévisions de la mécanique quantique étaient confirmées dans les conditions de l'expérience de pensée EPR et que celles des théories à variables cachées locales étaient infirmées. Ceci implique que les seules théories à variables cachées compatibles avec l'expérience sont forcément non locales. La non-localité (ou non-séparabilité) quantique est l'un des aspects parmi les plus étranges de la « réalité quantique ».

- [1] E. Schrödinger, *Ma conception du monde, le Veda d'un physicien*, Le Mail (1982).
- [2] R. Guénon, *Mélanges*, Gallimard, Paris (1976).
- [3] A. Kastler, *Cette étrange matière*, Stock (1976).
- [4] E. Noether, *Invariante Variationsprobleme*, *Nachr. d. König. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen. Math-phys. Klasse*, 235-257 (1918).
- [5] P.G. Lecomte, *Quelle logique pour le vivant ?*, thèse de doctorat, ENV Alford (1997).
- [6] G. Cohen-Tannoudji, *Les Constantes universelles*, Hachette (1991).
- [7] J.E. Charon, *Théorie unitaire*, Albin Michel (1974).
- [8] A. Einstein et L. Infeld, *L'évolution des idées en physique*, Flammarion (1983).
- [9] W. Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, Gallimard (1962).
- [10] B. d'Espagnat, *Leréel voilé, analyse des concepts quantiques*, Fayard (1994).
- [11] S. Lupasco, *Le principe d'antagonisme et la logique de l'énergie*, Ed. Hermann, Paris (1951).
- [12] N. Basarab, *Nous, la particule et le monde*, Ed. Le Rocher, Coll. Transdisciplinarité, 2^{ème} édition ; Monaco (2002).
- [13] L. Nottale, *The theory of scale relativity*, *Int. J. Mod. Phys. A7*, 4899-4936 (1992).
- [14] S. Lupasco, *Les trois matières*, Ed. Julliard, Paris (1960).
- [15] R. Laughlin, *A different universe: reinventing physics from the bottom down*, Basic Books Edition, New York (2005).
- [16] N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Gallimard, Paris (1991).
- [17] W. Pauli, Rosenfeld L., and Weisskopf V. Ed., *Niels Bohr and the development of physics*, London (1955).
- [18] A. Einstein, Podolsky B. and Rosen N., *Can Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?*, *Physical Review* vol. 47, 777-780 (1935).
- [19] J.S. Bell, *On the problem of hidden variables in Quantum Mechanics*, *Rev. Mod. Phys.*, 38, 447 (1966).
- [20] J. F. Clauser, Horne M.A., Shimony A. and Holt R.A., *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, *Phys. Rev. Lett.* 23, 880-884 (1969).
- [21] A. Aspect, *Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de polarisation de photons*, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Orsay (1983).