

BULLETIN N° 195
ACADÉMIE EUROPÉENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Lundi 4 mai 2015 à 15h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

I) de 15h30 à 16h30 exposé par notre Collègue Gilbert BELAUBRE
 de son projet de futur colloque (après 2016) intitulé:
" Les signatures de la conscience "

II) à 17 h Conférence de Franck LALOË
Directeur de recherches émérite au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS
" La mécanique quantique: historique, interprétations "

Prochaine séance :

Lundi 1er juin 2015 à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence du Pr Jean BRICMONT
Institut de Physique Théorique
Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve
"Peut-on comprendre la mécanique quantique"

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE PRESIDENT : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE
SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Claude ELBAZ

MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :
 Gilbert BELAUBRE
 François BEGON
 Bruno BLONDEL
 Michel GONDRAN

COMMISSION FINANCES: Claude ELBAZ,
COMMISSION MULTIMÉDIA: Pr. Alain CORDIER
COMMISSION EDITION: Robert FRANCK et Pr Pierre NABET

COMMISSION CANDIDATURES: Pr. Jean-Pierre FRANÇOISE

PRESIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LEVY (†)
PRESIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE
SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUJJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES :

CONSEILLERS SPECIAUX:
EDITION: Pr Robert FRANCK
AFFAIRES EUROPEENNES: Pr Jean SCHMETS
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF: Michel GONDRAN ex-Président
RELATIONS UNIVERSITES et MOYENS MULTIMEDIA: Pr Alain CORDIER
RELATIONS AX et MÉCENAT : Gilbert BELAUBRE

SECTION DE NANCY :
PRESIDENT : Pr Pierre NABET

mai 2015

N°195

TABLE DES MATIERES

p. 03 Séance du lundi 4 mai 2015

p. 09 Documents

Prochaine séance :

lundi 1er juin 2015 à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence du Pr Jean BRICMONT

Institut de Physique Théorique

Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve

"Peut-on comprendre la mécanique quantique"

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du Lundi 4 mai 2015

Maison de l'AX 17h

La séance est ouverte à 17h **sous la Présidence de Victor MASTRANGELO** et en la présence de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Jean-Pierre BESSIS, Michel CABANAC, Alain CARDON, Alain CORDIER, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Michel GONDRAN, Gérard LEVY, Antoine LONG, Pierre MARCHAIS, Alain STAHL, Jean-Pierre TREUIL.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Jean-Louis BOBIN, , Juan-Carlos CHACHQUES, Gilles COHEN-TANNOUJJI, Daniel COURGEAU, Ernesto DI MAURO, Vincent FLEURY, Robert FRANCK, Jean -Pierre FRANCOISE, Irène HERPE-LITWIN, Jacques LEVY , Gérard LEVY, Antoine LONG, Valérie LEFEVRE-SEGUIN, , Claude MAURY, Edith PERRIER, Pierre PESQUIES, Jean SCHMETS, , Jean VERDETTI.

I. Exposé par notre Collègue Gilbert BELAUBRE de son projet de futur colloque (après 2016) " Les signatures de la conscience "

A) synopsis projet de colloque

(Un compte-rendu détaillé sera prochainement publié sur le site de l'AEIS : <http://www.science-inter.com>)

Titre provisoire :

De la réaction aux environnements aux signatures de la conscience.

Le projet vise à présenter l'état des recherches concernant le cerveau humain et ouvrant sur les perspectives actuellement discernables.

Il est présenté conjointement par Gilbert Belaubre et Didier Desor (AEIS-section de Nancy)

Aujourd'hui, tout sujet d'étude concernant l'homme mérite que l'on recherche ses antécédents dans l'évolution. C'est particulièrement important pour les sujets pour lesquels, dans le passé, une idéologie séparait fondamentalement les propriétés et capacités humaines de celles des animaux.

Les comportements, la pensée, consciente et inconsciente, la capacité d'anticipation, le langage, la création artistique sont autant de domaines où , aujourd'hui, les études portant sur les animaux présentent un double intérêt :

1 – elles nous montrent que , dans tous les domaines, une certaine continuité se révèle au cours de l'évolution.

2 – du fait de la complexification au cours de l'évolution, il est indispensable de comprendre les stades successifs de cette complexité, dont on analyse plus aisément les contenus et les processus dans des stades précoces.

C'est pourquoi il paraît opportun d'entrer dans le sujet par la session consacrée à l'évolution.

Deux domaines paraissent essentiels :

1 – évolution de la représentation spatiale.

Un aspect très intéressant de cette évolution est la perception visuelle ; le passage , progressif, de la cellule photosensible à l'œil est l'exemple le plus fort de ces transformations progressives dont certains auteurs affirment qu'elle a pu se produire en moins de 4000 générations

2 – L'évolution qui conduit à la conscience est évidemment le point central de cette recherche La conscience apparaît très tôt, mais l'évolution montre qu'elle se manifeste par degrés.

3 – Un troisième intérêt majeur de l'étude de l'évolution réside dans le principe énoncé au début du 19^{ème} siècle selon lequel « *l'embryogenèse récapitule la phylogenèse.* » La formation des capacités cognitives chez l'enfant a des correspondances dans l'évolution.

Le deuxième point majeur est l'explosion des performances instrumentales dans l'imagerie.

Les techniques récentes permettent des investigations scientifiques inconcevables il y a vingt ans, .

Les pathologies du cerveau ont été les premières sources d'information concernant les localisations des fonctions mentales. Aujourd'hui encore, elles restent des sources précieuses grâce aux progrès de l'imagerie.

Bien entendu , les applications au diagnostic médical sont un apport majeur pour l'humanité.

L'étude approfondie de la physiologie du cerveau , par IRM fonctionnelle passe aussi par les électroencéphalogrammes, qui ont fait d'importants progrès, est un enjeu scientifique majeur. Une deuxième session pourrait être consacrée à ce domaine.

La présentation des recherches médicales conduira à un aspect en plein développement, qui est l'utilisation thérapeutique des cellules souches.

On fera alors le lien avec l'effondrement d'un vieux mythe, selon lequel le cerveau disposait d'un stock initial de neurones, et qu'il ne pouvait qu'en perdre par accident ou vieillissement.

Aujourd'hui la plasticité du cerveau est devenue un paradigme. Le cerveau fabrique des cellules et se modifie et se régénère.....ou finit, certes, par dégénérer.

Ces présentations permettront de consacrer la troisième session à la cognition, aux dernières recherches sur les modalités des processus de conscience, et aussi sur les efforts pour simuler le travail du cerveau, non seulement dans le but de comprendre, de représenter, de formuler des modèles, mais aussi de créer des machines capables de produire des activités cognitives .

Aujourd'hui la prise de conscience est directement analysée dans la mise en évidence de l'activité neuronale correspondante.

Les signatures de la conscience seront un thème majeur de cette troisième partie.

Mais les processus de mémoire, la création de la durée par structuration de la mémoire, et pour finir la capacité d'anticipation sont aussi des thèmes importants.

L'anatomie et la physiologie du cerveau sont désormais analysées avec précision.. Les fonctions des aires du cortex et des diverses zones du cerveau sont déchiffrées. Mais la complexité de leurs interactions est à peine abordée.

Les structures du cerveau sont sans doute hiérarchisées. Mais un principe semble acquis : le fonctionnement des liaisons en boucles neuronales en excitation périodique synchrone constitue un lien réciproque entre zones concernées.

L'étude à partir des éléments de base pour bâtir la structure s'impose, mais la complexité des liens a pu donner lieu à des hypothèses diverses.

Au modèle d'une structuration hiérarchisée s'opposent d'autres modèles, privilégiant des rapports horizontaux entre groupements de neurones.

Ce qui est certain, c'est que les processus de conscience mettent en activation ce que S. DEHAENE appelle « l'embrassement de la conscience ».

On est loin d'une idée ancienne, selon laquelle une partie relativement faible de l'ensemble des neurones « travaillaient » dans l'activité cervicale.

Aujourd'hui, on évalue à cent milliards le nombre de neurones, à 900 milliards le nombre de cellules gliales (astrocytes), à plusieurs milliers le nombre de connexions que chaque neurone établit avec ses voisines. On sait aussi, depuis les travaux d'Edelmann, que les circuits neuronaux sont toujours redondants, c'est-à-dire que de nombreuses fibres de neurones assument la même liaison, ce qui n'empêche pas certains d'attribuer un rôle déterminant à un seul neurone par exemple dans 'apparition d'un état de mémoire, le rôle d'un neurone dit « grand-mère ».

Ainsi, beaucoup de questions restent dans l'ombre de la complexité du cerveau dont Teilhard de Chardin disait qu'elle était le troisième infini. Certainement, rien n'est infini, mais la limite actuelle de nos moyens de calcul et de computation est encore bien faible en regard de la combinatoire de liaisons neuronales.

Les enjeux des projets de modélisations sont donc à la fois dans l'augmentation des capacités des ordinateurs, et dans la complexité des logiciels, mais aussi dans des recherches anatomiques et physiologiques visant à opérer des regroupements neuronaux formant des blocs susceptibles de réduire ; au cas par cas, la complexité des processus.

L'interdisciplinarité, est ici particulièrement difficile, parce que le mode de pensée du clinicien est très différent de celui du physicien, et même du biologiste.

Dans ses travaux sur l'approche scientifique de la psychiatrie, notre collègue Pierre Marchais a conclu à la nécessité d'une « révolution copernicienne » dans l'approche clinique de la psychiatrie.

Les scientifiques s'accordent peu à peu sur un point : l'introspection ne peut pas conduire à des progrès dans la recherche, seuls les relevés objectifs assurent le progrès des connaissances.

Cette troisième partie est assez lourde, même si elle peut être préparée par des communications des deux premières.

Mais il est sans doute préférable, pour l'instant de prévoir **une quatrième session** pas trop lourde pour laisser la place à une Table Ronde qui pourra être très riche , mais dont le contenu pourra être défini ultérieurement, par la réflexion dans un comité ad hoc.

La quatrième session pourrait comporter des communications sur les sujets suivants :

Parallèlement aux efforts de modélisation, les développements en intelligence artificielle ont fait d'importants progrès. Jusqu'où ces progrès peuvent-ils aller dans la reproduction des activités mentales ?

Où en sont les projets internationaux ? Où en est le projet européen HBP ('Human Brain Project), d'un budget de 1,1 milliards d'euros ?

Comment aborder les questions d'éthique ?

- Protection de la personne.

- Rapport de l'homme à la machine.
- Intégration universelle des personnes dans des réseaux entraînant les individus dans des asservissements insidieux.
- Ces problèmes se posent, dès aujourd'hui.

Ils vont s'aggraver vertigineusement.

Table ronde

Quelques pistes :

Notre cerveau est-il différent de celui des Grecs ?

Notre cerveau va-t-il évoluer par son rapport à la machine informatique ?

Peut-on faire des projections concernant :

- La capacité à analyser les grandes fonctions mentales
- à créer des thérapies pour la dégénérescence neuronale et pour les maladies neuronales en général

B) *Esquisse de projet de programme pour colloque sur Neurosciences/*

1ère session

DEVELOPPEMENT DU SYSTEME NERVEUX CENTRAL DANS L'EVOLUTION

1A - La perception de l'environnement : *Pr DESOR*

Pluralité des sensations, des perceptions, des relations à l'environnement *Pr. LECOINTRE*

1B - Evolution de la perception spatiale : du vers de terre au lézard, à la souris, au chimpanzé et à l'homme. Exemple de l'évolution de la perception lumineuse. De la cellule photosensible à l'œil.

1 -C Les stades successifs de la conscience. Où placer les limites ?

2ème session

PHYSIOLOGIE DU CERVEAU (CHEZ L'ANIMAL ET CHEZ L'HOMME)

2A – L'étude du cerveau : imagerie et électrophysiologie. Les enseignements des pathologies sur ce que peut être un « cerveau normal »

2B Plasticité ; capacités intégratives Les populations de neurones : flexibilité des structures et des processus : l'exemple du cerveau des oiseaux chanteurs. *Pr. Allison DOUBE*

2C Structure hiérarchique et structure modulaire : des modèles au cas par cas ?

2D Perspectives thérapeutiques (cellules souches). *Pr. GUILTEAU*

3ème session :

LES FONCTIONS SUPERIEURES DU CERVEAU HUMAIN..

3A - Enjeux technologiques des projets d'étude du cerveau humain : performances des images et des mesures, capacité calculatoire des ordinateurs. Capacité de mémoire. Complexité des logiciels

3B - I.A. : l'intelligence artificielle peut-elle devenir intelligente ? *Pr. HATON*

3C -La mémoire et la construction de la durée. La capacité d'anticipation. *Pr. CHAPOUTIER*

3D - Les signatures de la conscience *Pr DEHAENE*

4ème session :

L'AVENIR DE LA RECHERCHE ET LA QUESTION ETHIQUE.

4A - Les projets internationaux Le HBP Enjeux scientifiques, médicaux, pharmacologiques, financiers *Pr. MARKAM*

4B Problèmes éthiques *Pr .AMEISEN*

TABLE RONDE

II. 17 h Conférence de Franck LALOË " *La mécanique quantique: historique, interprétations* "

A. Présentation du conférencier Franck LALOË par notre Président

Franck LALOË est directeur de recherches émérite au CNRS au laboratoire Kastler Brossel de l'ENS. Ses travaux ont porté sur le pompage optique, la polarisation nucléaire dans l' He^3 , les gaz quantiques polarisés et la mécanique quantique.

Il a également effectué des recherches sur l'acoustique des instruments de musique.

Il est le coauteur avec Claude COHEN-TANNOUDJI et Bernard DIU de l'ouvrage de *Mécanique quantique paru chez Hermann*, d'usage répandu en France et à l'étranger.

Il a également rédigé : *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* chez EDP SCIENCES collection : *Savoirs Actuels* et qui porte sur les difficultés conceptuelles de la mécanique quantique et ses interprétations.

Le contenu de cet ouvrage est directement relié au contenu de son exposé.

B. Synopsis de la conférence présenté par notre Collègue Michel GONDRAN

La mécanique quantique: Développement historique, diverses interprétations.

Franck LALOË

Directeur de recherches émérite au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS

L'exposé de Franck Laloë s'est déroulé en trois parties; il a d'abord présenté un développement historique de la mécanique quantique montrant comment les idées sont apparues, puis il a soulevé quelques difficultés liées à la fonction d'onde, il a enfin développé quelques unes des principales interprétations. La principale question traitée étant: Pour finir, qu'est-ce donc vraiment que cette drôle de fonction d'onde?

Initiée par Planck pour le rayonnement du corps noir, par Einstein pour les quanta de lumières, par Bohr pour la stabilité des électrons atomiques, la mécanique quantique (mécanique des matrices) est proposé par Heisenberg tandis que de Broglie et Schrödinger introduisent une mécanique ondulatoire basée sur une fonction d'onde. Une synthèse est réalisée par Born (interprétation probabiliste de la fonction d'onde), par Bohr (interprétation de Copenhague qui donne un rôle essentiel à l'appareil de mesure), puis Dirac et Von Neumann qui proposent une version dites standard de la mécanique quantique (état quantique représenté dans un espace vectoriel avec un vecteur d'état qui généralise la fonction d'onde, introduction du "postulat de réduction du paquet d'ondes" lors d'une mesure).

De réelles difficultés conceptuelles subsistent:

- Dans le point de vue de von Neumann, comment se fait-il que l'on ait deux postulats d'évolution pour le même vecteur d'état? Quelles sont alors les limites exactes de leurs domaines d'application respectifs?

- Quel est donc le statut du vecteur d'état ? Décrit-il la réalité physique elle-même, ou seulement notre connaissance de la réalité? Dans le second cas, est-il juste l'analogie d'une distribution classique de probabilités?

- Dans le point de vue de Copenhague, d'où vient cette division entre système mesuré d'une part, appareil de mesure et observateur d'autre part? Quelles sont les limites relatives de ces deux mondes?

- Si le vecteur d'état donne juste une information, sur quoi porte cette information? Est-elle relative à l'observateur, ou universelle?

Ces difficultés montrent que nous sommes loin d'un consensus universel sur la meilleure façon d'interpréter la nature de la fonction d'onde, la mesure, etc. et leur relation (éventuelle) avec la "réalité physique". C'est pourquoi de nombreuses présentations et/ou interprétations de la mécanique quantique ont été proposées. LALOË nous en décrit quelques unes: bien sûr celle dite de Copenhague (BOHR), l'interprétation statistique (à laquelle on attache souvent le nom d'EINSTEIN), etc.. avec également les trois interprétations non-standard les plus célèbres: dBB (de BROGLIE-BOHM), GRW/CLS (équation de Schrödinger stochastique), EVERETT (parfois dite "des mondes multiples").

Et il termine par l'annonce de la fin des interdits sur la mécanique quantique:

"Mais bien des « interdits » énoncés par les « pères fondateurs de la théorie quantique » ont été bousculés : on peut observer des atomes ou des électrons uniques en temps réel, voir des sauts quantiques, etc.

On sait construire des théories plus simples conceptuellement que la mécanique quantique qui sont, elles aussi, en accord avec l'ensemble des données expérimentales actuelles. La théorie quantique peut être comprise sous une forme différente de celle que nous avons apprise; elle n'est peut-être pas immuable."

Compte-rendu de la conférence

Le compte-rendu complet sera réalisé par notre collègue Michel GONDRAN que nous remercions chaleureusement. Il sera accessible prochainement sur le site de l'AEIS <http://www.science-inter.com>

Notre Président Victor MASTRANGELO procède ensuite à la clôture de cette très riche séance.

Irène HERPE-LITWIN

Documents

I. Pour préparer la conférence du Pr Jean BRICMONT nous vous proposons:

p.10: le résumé de la conférence du Pr BRICMONT

p. 11: issu du site <http://www.asmp.fr/travaux/gpw/philosc/rapport2/3-Bricmont.pdf> , un article de jean BRICMONT intitulé " *La non-localité et la théorie de Bohm*"

II. Pour compléter la conférence de Frank LALOË nous vous proposons:

p 20: issu du site <http://www.cphi2.org/Portals/4/CR%203%20Oct%202011.pdf>. la première partie d'un article rédigé par Frank LALOË intitulé "*La théorie de l'onde pilote de Louis de BROGLIE et Davis BOHM*" . La suite est consultable sur le site ci-dessus.

- III. p 24 : issu du site <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2015.65072>
Notre Collègue Claude ELBAZ nous a confié son article intitulé " *Gravitation and Electromagnetism Conciliated Following Einstein's Program*" publié dans **Journal of Modern Physics, 2015, 6, 660-669** Published Online April 2015 in SciRes.
<http://www.scirp.org/journal/jmp>

PEUT-ON COMPRENDRE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

par le Professeur Jean Bricmont
 Institut de Physique Théorique
 Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, BELGIUM

Résumés anglais/français de la conférence
 AEIS du 1er juin 2015, 17h,
 5, rue Descartes, 75005, Paris, France

Abstract:

After explaining the two main conceptual problems raised by quantum mechanics, namely the superposition principle and non-locality, I will discuss a way to understand these problems in rational terms: the de Broglie-Bohm theory. In that theory, particles have positions at all times, and therefore also velocities. One of the most interesting aspect of this theory is that, when one analyzes what "measurements" are, one realizes that, in general, measurements do not measure any pre-existing property of the system being "measured". In particular, this implies that there is no contradiction between the existence of trajectories and of velocities and the Heisenberg uncertainty principle.

Résumé:

Après avoir exposé les deux principaux problèmes conceptuels soulevés par la mécanique quantique, notamment le principe de superposition et de non-localité, je discuterai d'un moyen de comprendre ces problèmes en termes rationnels : la théorie de Broglie-Bohm. Dans cette théorie, les particules ont des positions à chaque instant et de ce fait aussi des vitesses. L'un des aspects les plus intéressants de cette théorie est le fait que lorsqu'on analyse ce que représentent des prises de mesures, on réalise qu'en général, celles-ci ne mesurent aucune des propriétés préexistantes du système "mesuré". En particulier, ceci implique l'absence de contradiction entre l'existence de trajectoires et de vitesses avec le principe d'incertitude d'Heisenberg.

Références:

Contre la philosophie de la mécanique quantique.

In: Les sciences et la philosophie. Quatorze essais de rapprochement, p.131-179,
 R. Franck (ed), Vrin, Paris, 1995. And, in: Intrusions spiritualistes et impostures intellectuelles en sciences. Sous la direction de J. Dubessy et G. Lecointre, Syllepse, Paris, 2001.

What is the meaning of the wave function?

In: Fundamental interactions: from symmetries to black holes,
 p. 53-67, J.-M. Frère, M. Henneaux, A. Sevrin, Ph. Spindel (eds),
 Conference held on the occasion of the "Eméritat" of François Englert, Université Libre de Bruxelles,
 Brussels, 1999

La non-localité et la théorie de Bohm

par Jean Bricmont

<http://www.asmp.fr/travaux/gpw/philosc/rapport2/3-Bricmont.pdf>

1- La non-localité

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) [13] ont mis le doigt sur l'aspect conceptuellement le plus révolutionnaire de la mécanique quantique. Malheureusement, cet aspect a été généralement incompris à l'époque et l'article a été présenté par ses auteurs comme étant seulement une critique de l'interprétation traditionnelle de la mécanique quantique.

Ce n'est qu'en 1964 que John Bell a montré que la seule conclusion possible de l'analyse d'Einstein, Podolski et Rosen est que le monde est non local. Afin de comprendre précisément ce que cela veut dire, voyons d'abord l'argument d'Einstein, Podolski et Rosen. On construit une source qui envoie les particules dans des directions opposées, disons vers la gauche et vers la droite, et ces particules se trouvent dans un certain état quantique. On place des instruments de mesure, un pour chaque particule. Ces instruments peuvent, en principe, être placés arbitrairement loin l'un de l'autre¹. Ces appareils peuvent chacun se trouver dans trois positions (1, 2 ou 3) et le résultat de la mesure est de type binaire : nous le noterons « oui » ou « non ». Le résultat d'une expérience peut donc être mis sous la forme, par exemple (1, oui, 2, non) c'est-à-dire que l'appareil de gauche est dans la position 1 et le résultat est « oui », tandis que celui de droite est dans la position 2 et le résultat est « non ».

Einstein, Podolsky et Rosen sont partis du fait que l'état quantique prédit une corrélation parfaite quand les appareils, à gauche et à droite, sont dans la même position : s'ils sont tous deux sur 1 (ou 2, ou 3) les réponses seront toutes deux « oui » ou toutes deux « non »². Mais l'état quantique des particules ne nous dit pas si le résultat sera « oui » ou « non ». En langage imagé, chacune des particules n'est ni prête à dire « oui » ni prête à dire « non », quelle que soit la direction dans laquelle on « l'interroge ».

Supposons maintenant qu'on ne fasse d'abord qu'une mesure à gauche en retardant la mesure à droite — on recule un peu l'appareil de mesure. Immédiatement après la mesure à gauche, on est sûr du résultat à droite : oui si le résultat à gauche est oui, non si le résultat à gauche est non. En effectuant la mesure à gauche, a-t-on changé l'état physique du système à droite³ ? Si l'on s'en tient à la description qui vient d'être donnée, la réponse est oui : avant la mesure (à gauche), le système était radicalement indéterminé (des deux côtés) et, après la mesure (à gauche) il est déterminé (à gauche et à droite), en ce sens que la mesure ultérieure (à droite) a maintenant un résultat bien déterminé. Il semble donc qu'on a affaire à une forme d'action à distance, peut-être subtile mais une action quand même⁴.

¹ Pour que ce qui suit reste valable, il faut que les particules soient isolées du reste du monde avant d'interagir avec l'appareil de mesure, ce qui en pratique semble impossible pour de très grandes distances. Dans les expériences actuelles, les distances sont de l'ordre de quelques kilomètres. Néanmoins, le phénomène est tellement extraordinaire que le fait qu'en principe la distance entre appareils de mesure puisse être aussi grande qu'on veut mérite d'être souligné.

² Chaque « réponse » apparaissant avec une fréquence 1/2 lorsqu'on répète l'expérience un grand nombre de fois.

³ Dans le formalisme habituel ce qui se passe c'est simplement que la mesure à gauche réduit la fonction d'onde mais, vu sa forme, la réduction opère aussi à droite. Évidemment, l'importance que l'on attache à ce fait, quand il est exprimé dans le formalisme de la mécanique quantique, renvoie au statut que l'on accorde à la fonction d'onde et à sa réduction. C'est pourquoi il vaut mieux discuter de la non-localité directement, sans passer par le formalisme de la mécanique quantique, pour éviter de mêler ce problème avec celui des interprétations. De plus, on montre ainsi que la non-localité est une propriété de la nature établie à partir d'expériences et de raisonnements élémentaires, indépendamment de l'interprétation qu'on donne du formalisme quantique. Par conséquent, toute théorie ultérieure qui pourrait remplacer la mécanique quantique devra également être non-locale.

⁴ Il est difficile d'exprimer combien cette notion d'action à distance fait horreur à certains physiciens : Newton écrivait « qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide et sans la médiation de quelqu'autre corps... me paraît être une telle absurdité que je pense qu'aucune personne ayant la faculté de raisonner dans des questions philosophiques ne pourra jamais y croire » (cité dans [20], p.213) et Einstein, parlant de la situation décrite dans l'article EPR disait « Ce qui existe

Néanmoins, il y a un trou béant dans cet argument : qu'est-ce qui nous dit que, lorsque nous effectuons la mesure à gauche, nous ne découvrons pas une propriété intrinsèque de la particule — exprimée sous la forme de la « réponse » oui/non — qui serait simplement la même pour la particule envoyée à droite ? Bien sûr, le formalisme quantique ne parle pas de telles propriétés — les particules ne disent ni oui ni non avant d'être mesurées —, mais pourquoi ce formalisme est-il le dernier mot de l'histoire ? Avant d'admettre une conclusion aussi radicale que la non-localité, il faudrait peut-être envisager toutes les autres possibilités. Par exemple, comme les particules proviennent d'une source commune, il se peut très bien, a priori, qu'elles emportent avec elles des « instructions » qui spécifient comment répondre aux différentes questions⁵. Et, alors, il n'y a plus aucun mystère ni action à distance dans le fait que leurs réponses sont les mêmes. Et pour Einstein, Podolsky et Rosen, c'était bien la conclusion qui s'imposait : la non-localité étant impensable, ils pensaient avoir démontré que la mécanique quantique était « incomplète ». Il faut bien préciser le sens de ce mot. Cela ne veut pas dire que ces « instructions », ou « variables cachées » comme on les appelle — c'est-à-dire n'importe quoi qui n'est pas inclus dans la fonction d'onde — soient accessibles à notre connaissance, que nous puissions les manipuler, les prédire, etc. C'est 3 Dans le formalisme habituel ce qui se passe c'est simplement que la mesure à gauche réduit la fonction d'onde mais, vu sa forme, la réduction opère aussi à droite. Évidemment, l'importance que l'on attache à ce fait, quand il est exprimé dans le formalisme de la mécanique quantique, renvoie au statut que l'on accorde à la fonction d'onde et à sa réduction. C'est pourquoi il vaut mieux discuter de la non-localité directement, sans passer par le formalisme de la mécanique quantique, pour éviter de mêler ce problème avec celui des interprétations. De plus, on montre ainsi que la non-localité est une propriété de la nature établie à partir d'expériences et de raisonnements élémentaires, indépendamment de l'interprétation qu'on donne du formalisme quantique. Par conséquent, toute théorie ultérieure qui pourrait remplacer la mécanique quantique devra également être non-locale. simplement qu'elles existent. Qu'il y ait quelque chose dans le monde, un mécanisme, déterministe ou probabiliste peu importe, qui explique comment la source donne ces « instructions » aux particules. En fait, il y a une interprétation de la mécanique quantique qui est parfaitement compatible avec cette façon de voir les choses. On donne à la fonction d'onde un statut purement épistémique. Elle représente tout ce que nous pouvons connaître, à jamais, sur le système. Ceci n'empêche nullement qu'il existe des variables « cachées » qui déterminent, pour chaque particule le résultat de la mesure : pour chaque position 1, 2 ou 3, une particule donnée répondra oui ou non et cette réponse sera la même à gauche et à droite, parce que les deux particules viennent de la même source. Mais, comme nous n'avons pas accès à ces réponses avant de les mesurer et que l'état initial est tel que les réponses sont, une fois sur deux, oui et une fois sur deux non, on a l'illusion d'une action à distance.

Maintenant, venons-en à Bell. Ce qu'il montre, c'est que de telles instructions ou « variables cachées » qui sauveraient la localité n'existent simplement pas. Comment peut-on tester une idée apparemment aussi « métaphysique » ? On regarde ce qui se passe quand les détecteurs ne sont pas alignés. Alors, on n'a plus de corrélation parfaite, mais on obtient certains résultats statistiques⁶, également prédits par la mécanique quantique, et qui sont incompatibles avec la simple existence d'instructions expliquant la corrélation parfaite. Il faut souligner qu'ici on a affaire à une déduction purement mathématique⁷. De plus, comme ces prédictions de la mécanique quantique ont été vérifiées expérimentalement [1], on peut faire le raisonnement en se passant de la théorie et en concluant que la non-localité est déduite directement de l'expérience via le raisonnement d'EPR-BeII. Mais il ne faut pas

réellement en un point B ne devrait pas dépendre du type de mesure qui est faite en un autre point A de l'espace. Cela devrait également être indépendant du fait que l'on mesure ou non quelque chose en A » (cité dans [23], p.121).

⁵ Le mot « instruction » est dû à Mermin [22]. Mais peu importe le terme, il désigne n'importe quoi qui permette d'expliquer comment le fait que les particules proviennent d'une source commune peut rendre compte, de façon purement locale, des corrélations parfaites.

⁶ Il existe une variante de l'argument de Bell [19], avec trois particules, et dans laquelle on n'a pas besoin de statistique : un seul événement suffit pour montrer l'inexistence de ces « instructions ». Mais, dans ce cas, l'expérience n'a pas encore été faite

⁷ Qui est tellement simple qu'on peut en esquisser la démonstration : si les instructions existent, comme il n'y a que deux réponses (oui/non) pour trois « questions » ou positions (1, 2, 3), il faut nécessairement que, dans chaque expérience, au moins deux réponses à des questions différentes coïncident. Donc, si l'on additionne les fréquences avec lesquelles des réponses identiques apparaissent lorsqu'on pose des questions différentes, on obtient un nombre plus grand ou égal à 1. Or, pour des expériences quantiques appropriées, cette somme est égale à 3/4. D'où une contradiction.

oublier la partie EPR de l'argument. Sinon, on en conclut que Bell a simplement montré l'inexistence de certaines variables cachées — comme on l'avait toujours pensé de toutes façons — et que « Bohr gagne à nouveau » [2]⁸. Mais ce n'est pas du tout de cela qu'il s'agit. L'inexistence de ces variables cachées implique que le monde est non-local, puisque ces variables étaient la seule « porte de sortie » aux vues de l'argument EPR. Et c'est cela qui est réellement surprenant dans le résultat de Bell.. Voici ce qu'il en dit lui-même : « Le malaise que je ressens vient de ce que les corrélations quantiques parfaites qui sont observées semblent exiger une sorte d'hypothèse « génétique » (des jumeaux identiques, qui ont des gènes identiques). Pour moi, il est si raisonnable de supposer que les photons dans ces expériences emportent avec eux des programmes, qui sont corrélés à l'avance, et qui dictent leur comportement. Ceci est si rationnel que je pense que, quand Einstein a vu cela et que les autres refusaient de le voir, il était l'homme rationnel. Les autres, bien que l'histoire leur ait donné raison, se cachaient la tête dans le sable. Je pense que la supériorité intellectuelle d'Einstein sur Bohr, dans ce cas-ci, était énorme ; un immense écart entre celui qui voyait clairement ce qui était nécessaire, et l'obscurantiste. Aussi, pour moi, il est dommage que l'idée d'Einstein ne marche pas. Ce qui est raisonnable simplement ne marche pas ». ([4], p. 84). Il faut souligner que Bell est encore trop gentil : l'histoire n'a pas simplement donné raison aux adversaires d'Einstein. Ceux-ci ne voyaient pas clairement la non-localité présente dans la nature ; le fait que « nous ne puissions pas éviter le fait que l'intervention d'un côté ait une influence causale de l'autre » ([2], p. 150) n'est devenu clair qu'avec le résultat de Bell.

Voyons plus en détail ce que la non-localité est réellement. Pour cela, je vais donner d'abord deux exemples de ce qu'elle n'est pas⁹. Premièrement, imaginons que je coupe en deux une image et que j'envoie par courrier chaque moitié à des correspondants mettons l'un aux Etats-Unis, l'autre en Australie. Ces deux personnes ouvrent simultanément leur courrier ; chacune apprend instantanément (étant supposé qu'elles sont au courant de la procédure) quelle moitié de l'image l'autre a reçu. Disons qu'il y a acquisition (instantanée) d'information à distance, mais il n'y a rien de mystérieux. Ce que le résultat de Bell nous dit, c'est que la situation EPR n'est nullement de ce type. Ici, chaque moitié de l'image correspondrait aux instructions dont Bell montre qu'elles n'existent pas. Prenons un autre exemple, radicalement différent. Imaginons un sorcier ou un magicien qui agit à distance : en manipulant une effigie il influence l'état de santé de la personne représentée par celle-ci. Ce genre d'action (imaginaire) à distance a quatre propriétés remarquables :

1. elle est instantanée, ou, du moins, comme on est dans l'imaginaire, on peut le supposer ;
2. elle est individuée : c'est une personne particulière qui est touchée et pas celles qui sont à côté ;
3. elle est à portée infinie : même si la personne en question se réfugiait sur la lune, elle n'échapperait pas à l'action du sorcier ;
4. elle permet la transmission de messages : on peut coder un message sous forme d'une suite de 0 et de 1 et l'envoyer en faisant correspondre un 1 à l'action du magicien, pendant une unité de temps, et un 0 à son absence d'action.

Ce qui est extraordinaire avec la non-localité quantique, c'est qu'elle a les trois premières propriétés « magiques » *mais pas la quatrième*. Les propriétés 2 et 3 sont sans doute les plus surprenantes : si l'on envoie un grand nombre de paires de particules en parallèle, un appareil de mesure à gauche va influencer l'état de la particule à droite qui est « jumelle » de celle qui est mesurée et pas les autres. De plus, cette action ne décroît pas en principe avec la distance, contrairement à toutes les forces connues en physique¹⁰. Finalement, cette action semble instantanée, en tout cas elle se propage plus vite

⁸ Bell se plaint lui-même de ce que son théorème soit presque systématiquement interprété comme simplement une réfutation des théories de variables cachées, en oubliant les conséquences concernant la localité : « Mon premier article sur le sujet (Physics 1, 135 (1965)) commence par un résumé de l'argument EPR, déduisant de la localité les variables cachées déterministes. Mais les commentateurs ou presque universellement dit que cet article portait de variables cachées déterministes » ([2], p.157).

⁹ Le premier exemple est similaire à celui des chaussettes de M. Bertlmann [2], donné par Bell. Pour un exemple remarquable d'incompréhension de cet article, voir Gell-Mann, [15], p. 172.

¹⁰ Pourvu que les particules soient isolées, ce qui impossible en pratique pour de grandes distances. Par ailleurs, il ne s'agit pas d'une "force" mais d'un phénomène nouveau.

que la vitesse de la lumière [1]. Mais elle ne permet pas d'envoyer des signaux. La raison en est simple : quelle que soit l'orientation de l'appareil de mesure à gauche, le résultat à droite sera une suite aléatoire de « oui » et de « non ». Ce n'est qu'a posteriori qu'on peut comparer les suites de résultats obtenus et constater la présence de corrélations étranges. Le caractère aléatoire des résultats bloque en quelque sorte la transmission de messages : voir [20], [21] pour une discussion plus approfondie.

On ne saurait trop insister sur cet aspect de la situation EPR : ceci la distingue radicalement de toute forme de magie et invalide à l'avance les efforts de ceux qui voudraient voir dans le résultat de Bell une porte ouverte pour une justification scientifique de phénomènes paranormaux¹¹.

Mais les autres aspects sont bien là, et ils sont déconcertants : instantanéité, individualité, non-décroissance avec la distance. Du moins, c'est la conclusion qu'on peut tirer aujourd'hui, aux vues des résultats expérimentaux.

De plus, il faut se garder de conclure que l'impossibilité d'envoyer des signaux signifie qu'il n'y ait pas d'action à distance ni de relation de cause à effet. La notion de cause est compliquée à analyser mais, comme le fait remarquer Maudlin [21], les tremblements de terre ou le Big Bang ne sont pas contrôlables et ne permettent donc pas l'envoi de signaux, mais ce sont néanmoins des causes ayant certains effets. La notion de signal est bien trop anthropocentrique pour que la notion de cause puisse lui être réduite.

Quelles sont les réactions des physiciens face au théorème de Bell ? Le moins que l'on puisse dire c'est qu'elles varient. À un extrême, H. Stapp déclare que « le théorème de Bell est la plus profonde découverte de la science » [25] et un physicien de Princeton déclare « celui qui n'est pas dérangé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête » [22]. Mais l'indifférence est néanmoins la réaction la plus répandue. Mermin distingue différents types de physiciens [22] : ceux du premier type sont dérangés par EPR-Bell. La majorité (le type 2) ne le sont pas, mais il faut distinguer deux sous-variétés. Ceux de type 2a expliquent pourquoi cela ne les dérange pas. Leurs explications tendent à être entièrement à côté de la question ou à contenir des assertions physiques dont on peut montrer qu'elles sont fausses. Ceux du type 2b ne sont pas dérangés et refusent de dire pourquoi. Leur position est inattaquable ; il existe encore une variante du type 2b qui disent que Bohr a tout expliqué mais refusent de dire comment.

Les explications reviennent toujours — du moins d'après mon expérience personnelle — à une des deux positions suivantes.

Dans le premier cas, on déclare qu'il n'y a pas d'action à distance parce qu'on apprend simplement quelque chose sur la particule à droite en effectuant la mesure à gauche. Born adoptait cette position : « Le fond de la différence entre Einstein et moi était l'axiome que des événements se produisant à des endroits différents A et B sont indépendants l'un de l'autre en ce sens que l'observation de la situation en A ne peut rien nous apprendre sur la situation en B » [7]. Bell ajoute correctement : « L'incompréhension était totale. Einstein n'avait aucune difficulté à admettre que des situations à des endroits différents soient corrélées. Ce qu'il n'acceptait pas c'est que l'action en un endroit puisse influencer, immédiatement, la situation en un autre endroit »¹². [2]. L'idée de Born, quand on la rend précise, mène justement aux « variables cachées », dont Bell montre que la simple existence est impossible.

La deuxième réponse revient à dire que la mécanique quantique explique le phénomène et qu'elle est complète et locale. D'abord, comme le dit Bell « la mécanique quantique n'explique pas vraiment ; en fait, les pères fondateurs de la mécanique quantique se flattaient plutôt de renoncer à l'idée

¹¹ Pour une bonne critique des pseudo-sciences, voir [8], et surtout [14] sur l'usage abusif de l'expérience EPR par des parapsychologues.

¹² Et Bell ajoute : « Ceci illustre la difficulté qu'il y a à mettre de côté ses préjugés et à écouter ce qui est réellement dit. Ceci doit aussi vous encourager vous, cher auditeur, à écouter un peu mieux ».

d'explication » ([10], p. 51). Évidemment, la mécanique quantique prédit les corrélations parfaites et imparfaites qui interviennent dans le raisonnement EPR-Bell. Mais est-ce que prédire équivaut à expliquer ? Pour comprendre la différence entre ces deux notions, imaginons un vrai magicien agissant vraiment à distance, d'une façon qui défierait toutes les lois de la physique, mais qui pourrait parfaitement prédire quand ses pouvoirs agissent. Personne ne prendrait cette prédiction pour une explication.

Néanmoins, on peut donner une explication du phénomène EPR-Bell dans le cadre de la mécanique quantique. On donne à la fonction d'onde un statut physique et non simplement épistémique et l'on introduit deux types d'évolutions temporelles pour la fonction d'onde : l'évolution donnée par l'équation de Schrödinger en dehors des opérations de mesure et la « réduction » de la fonction d'onde, lorsqu'une mesure a lieu — la nécessité de l'introduction de cette double dynamique sera discutée dans la section suivante. Le problème est alors que l'opération de réduction est, dans la situation envisagée par EPR, manifestement non-locale. Il n'est simplement pas correct de dire que la mécanique quantique, telle qu'elle est présentée dans la plupart des manuels, est locale. Seule la partie « équation de Schrödinger » de la théorie l'est, pas la réduction.

Toute cette discussion montre que l'ambiguïté sur le statut de la fonction d'onde — moyen de calcul, objet réel ? — entretenue par une certaine tradition philosophique de type positiviste ou instrumentaliste a rendu difficile la compréhension de la non-localité.

Comme cette action à distance est instantanée ou, du moins, plus rapide que la vitesse de la lumière, n'entre-t-elle pas en contradiction avec la relativité ? C'est une question assez complexe que je ne vais pas développer — voir [21] pour une discussion approfondie de ce problème —, mais il est clair qu'il y a un problème. Comme le dit Penrose : « Il y a un conflit entre notre image spatio-temporelle de la réalité physique — même l'image quantique non-locale qui est correcte — et la relativité restreinte ! » [24]. Mais, comme l'inégalité de Bell est interprétée en général de façon incorrecte, le problème du conflit — subtil mais réel — entre non-localité et relativité n'apparaît même pas. Néanmoins, il faut souligner que la simple existence d'une théorie quantique et relativiste des champs — dont les prédictions sont les plus spectaculairement vérifiées par l'expérience dans toute l'histoire des sciences — ne permet pas de nier le problème. En effet, la réduction de la fonction d'onde n'est nulle part traitée de façon relativiste. Et c'est via cette opération que la non-localité s'introduit de façon explicite dans le formalisme quantique.

2- Le problème de la mesure et la théorie de Bohm

Il y a plusieurs façons d'énoncer le « problème de la mesure » en mécanique quantique. La façon la plus traditionnelle est de partir de l'existence de superpositions macroscopiques, qui suit inéluctablement de la description quantique du processus de mesure, c'est-à-dire d'une description qui applique les raisonnements quantiques aux appareils de mesure eux-mêmes. L'expression « raisonnements quantiques » renvoie à l'idée que la fonction d'onde donne une description complète de l'état du système et que son évolution est donnée uniquement par l'équation de Schrödinger¹³.

Rappelons brièvement l'argument, qui remonte à von Neumann : supposons que l'on mesure le spin d'une particule dans une direction donnée. Si la fonction d'onde de la particule est initialement « up » dans cette direction, et l'appareil de mesure initialement dans un état « neutre », la mesure induira un couplage entre les deux systèmes — dont on n'a nullement besoin de connaître les détails — et le résultat sera une fonction d'onde combinée indiquant que le spin de la particule est toujours « up », et que l'appareil a détecté une particule ayant un spin « up ». La même chose est vraie, mutatis mutandis, pour le spin « down ». Maintenant surgit le problème : si l'on part d'une particule qui est dans une superposition de spin up et de spin down, alors la simple linéarité des lois d'évolution quantique implique que l'appareil de mesure sera dans une superposition d'état « ayant détecté un spin up » et «

¹³ 13 C'est-à-dire sans introduire dès le départ la réduction de la fonction d'onde. Académie des Sciences morales et politiques

ayant détecté un spin down ». Or cela, nous ne l'observons jamais. Pour le dire d'une façon un peu brutale, mais correcte, la mécanique quantique fait une prédiction non ambiguë qui se révèle fautive ; donc, elle doit être rejetée. Néanmoins, vu le succès spectaculaire de la mécanique quantique, il serait déraisonnable de la rejeter purement et simplement. Mais il faut la modifier d'une façon ou d'une autre.

On peut, en gros, suivre deux voies pour sortir de cette impasse. L'une, c'est de considérer que l'évolution quantique n'est pas toujours respectée, l'autre, c'est de dire que la fonction d'onde ne décrit pas entièrement le système. On pourrait sans doute montrer comment les adeptes de l'interprétation de Copenhague se rallient en fait à une de ces deux solutions, en dépit des grandes proclamations philosophiques qui tentent de nier l'existence même d'un problème. Si l'on soutient par exemple qu'il est irréaliste d'attribuer une fonction d'onde à l'appareil de mesure, cela veut dire que la fonction d'onde ne décrit pas entièrement tous les systèmes physiques. Même chose si l'on soutient une interprétation épistémique de la fonction d'onde, c'est-à-dire que celle-ci représente la connaissance que nous avons du système. Si, par contre, on introduit la réduction de la fonction d'onde, alors on admet implicitement que l'évolution de Schrödinger n'est pas toujours valable. Idem si l'on introduit une distinction nette et irréductible entre classique et quantique ou microscopique et macroscopique.

Si l'on cherche à remplacer l'évolution de Schrödinger par une opération non-linéaire ou stochastique, celle-ci devrait avoir deux propriétés : être suffisamment bien approximée par l'évolution de Schrödinger, lorsqu'on discute d'un petit nombre de particules, de façon à ce que les prédictions de la mécanique quantique restent vraies pour la nouvelle théorie, et se ramener, lorsque l'on s'intéresse à un grand nombre de particules — par exemple, à un appareil de mesure —, essentiellement à la réduction. Vu la difficulté mathématique inhérente au traitement d'équations non-linéaires, le fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de théories satisfaisantes de ce type ne peut pas être considéré comme un argument très fort contre cette suggestion. De plus, comme la plupart des physiciens considèrent la mécanique quantique ordinaire comme acceptable, peu d'essais, en fin de compte, ont été faits. Roger Penrose encourage cette approche au moyen de l'analogie suivante : « Néanmoins, je pense qu'il serait surprenant si la théorie quantique ne devait pas subir un profond changement dans l'avenir — vers quelque chose dont cette linéarité serait seulement une approximation. Il y a certainement des antécédents de ce genre de changements. La puissance et l'élégance de la théorie de la gravitation universelle de Newton est en grande partie due au fait que les forces dans cette théorie s'additionnent linéairement. Mais, avec la relativité générale d'Einstein, on voit que cette linéarité est seulement une approximation — et l'élégance de la théorie d'Einstein dépasse même celle de la théorie de Newton » [24]. Signalons qu'à défaut d'une théorie non-linéaire, il existe une théorie stochastique, où la fonction d'onde est réduite aléatoirement, avec une faible probabilité pour un système microscopique, à tout moment. Mais, quand on considère un grand nombre de particules, comme dans un appareil de mesure, la probabilité d'une réduction devient grande. Cette théorie, appelée « GRW » d'après les noms de ses auteurs — Ghirardi, Rimini et Weber — est, dans sa formulation actuelle, fort ad hoc, mais a néanmoins le mérite de résoudre le problème de la mesure : les « sauts quantiques » qui se produisent partout et tout le temps sont simplement amplifiés à cause du caractère nécessairement macroscopique de l'appareil de mesure.

Si l'on veut, au contraire, une théorie où la description complète de l'état du système ne se réduise pas à la fonction d'onde, il faut faire attention à différents théorèmes qui montrent que donner à un certain ensemble de variables une valeur avant toute « mesure » est tout aussi impossible — et pour des raisons similaires — que d'introduire des variables « cachées » qui sauveraient la localité¹⁴.

Il existe néanmoins, depuis 1952, une théorie qui résout le problème de la mesure et échappe à toutes ces impossibilités, de façon très naturelle : la théorie de Bohm. Dans cette théorie, la description complète de l'état du système est donnée à la fois par la fonction d'onde habituelle et par les positions de toutes les particules. Ces dernières sont ce que Bell appelle les « beables » de la théorie, c'est-à-dire ce qui existe, par opposition aux simples observables. La dynamique est donnée par deux équations : d'une part, l'évolution habituelle de Schrödinger, qui détermine comment évolue la fonction d'onde et d'autre part l'équation de Bohm, qui détermine comment les particules sont guidées par l'onde.

¹⁴ Voir [9] pour une discussion plus approfondie de ces théorèmes.

La théorie est parfaitement déterministe et l'accord avec l'expérience s'obtient en postulant que les positions initiales du système sont distribuées aléatoirement et que cette distribution initiale coïncide avec le carré de la valeur absolue de la fonction d'onde, c'est-à-dire la distribution de Born. La dynamique de la théorie de Bohm possède en effet une propriété remarquable, dite d'équivariance, qui signifie que, si la distribution initiale coïncide avec celle de Born, alors elle coïncidera avec elle à tous les temps ultérieurs — pour la nouvelle fonction d'onde obtenue en appliquant l'évolution de Schrödinger à la fonction d'onde initiale. On peut évidemment s'interroger sur la justification du choix de la distribution initiale, qui est une question complexe¹⁵. Remarquons néanmoins qu'ici le caractère apparemment « aléatoire » des résultats expérimentaux s'explique, comme pour des systèmes dynamiques classiques, par exemple « chaotiques », au moyen d'une hypothèse sur les conditions initiales, alors que, dans l'interprétation traditionnelle, ce caractère aléatoire n'est pas expliqué du tout.

La théorie de Bohm possède deux autres qualités importantes. D'une part, non seulement elle échappe à tous les théorèmes d'impossibilité sur les variables cachées, mais elle permet de comprendre intuitivement l'origine de ces théorèmes. Il n'y a pas de « variables cachées » dans cette théorie, autres que les positions¹⁶. Il n'y a pas de valeur assignée par le système à des opérateurs tels que le moment, le spin, le moment angulaire, etc., valeur qui serait déterminée avant ces interactions spécifiques avec des dispositifs macroscopiques appelés « appareils de mesure ». On peut, dans la théorie de Bohm, analyser comment ces interactions ont lieu¹⁷ et voir que le résultat ne dépend pas seulement de l'état complet du système microscopique mais aussi de la disposition particulière de l'appareil. Donc, toute « mesure » de quelque observable que ce soit, sauf la position, est une interaction authentique entre le système et l'appareil. Elle ne révèle pas simplement des propriétés préexistantes du système et ne devrait donc pas être appelée « mesure ». On pourrait aussi dire que — suprême ironie de l'histoire — la théorie de Bohm rend concrète et mathématiquement précise l'intuition de Bohr concernant l'impossibilité de séparer le système et l'appareil.

La non-localité est, d'autre part, aussi facile à comprendre dans la théorie de Bohm. L'observation de base est que la fonction d'onde est une fonction définie sur l'espace de configuration et non, comme, par exemple, le champ électromagnétique, sur l'espace physique. Considérons deux particules et supposons qu'il y ait un potentiel localisé dans le voisinage de l'origine, et correspondant à l'introduction d'un dispositif de mesure agissant sur la première particule. L'évolution de la fonction d'onde sera affectée par le potentiel via l'équation de Schrödinger ; cependant, la fonction d'onde détermine les trajectoires des deux particules via l'équation de Bohm. Donc, la trajectoire de la seconde particule sera aussi (indirectement) affectée par le potentiel (c'est-à-dire le dispositif de mesure), même s'il arrive qu'elle soit très éloignée de l'origine. Ceci donne une certaine compréhension de ce qui se passe quand la polarisation ou les « mesures » du spin sont accomplies sur des paires (anti-)corrélées. Les résultats, comme le montre Bell, ne sont pas déterminés avant l'interaction avec un dispositif de mesure. Et c'est pourquoi les parfaites corrélations sont dues à une forme subtile de « communication » entre les deux côtés de l'expérience. Cette dernière est rendue possible parce que la fonction d'onde met en connexion des parties distantes de l'univers grâce à l'équation de Bohm.

Une remarque finale : les objections les plus courantes contre la théorie de Bohm concernent son caractère « métaphysique » et « non-local, donc incompatible avec la relativité ». Je laisse de côté la première objection, qui reflète une certaine incompréhension de type « positiviste » concernant la nature des théories physiques. Mais la seconde objection est étrange : après tout, ce que le théorème de Bell montre, c'est qu'une théorie qui fait des prédictions expérimentales correctes doit être non-locale. Etre

¹⁵ 15 Voir [11] pour une discussion plus approfondie de cette question.

¹⁶ Appeler les positions des variables cachées est, comme dit Bell, une idiotie héritée de l'histoire ([3], p. 163). On appelle traditionnellement variables cachées tout ce qui ne se réduit pas à la fonction d'onde. Mais les positions sont les seules variables qui sont réellement visibles : la vitesse d'une voiture se mesure par la position d'une aiguille sur un cadran et on peut facilement voir qu'en général toutes les « mesures » peuvent être ramenées à des mesures de positions. Par contre, la fonction d'onde est « cachée », en ce sens que nous inférons ses propriétés à partir des mesures faites antérieurement sur le système.

¹⁷ Voir [9], [16] [3], chap. 17 pour plus de détails.

non-locale devrait être considéré, pour une théorie, comme une vertu indispensable plutôt que comme un défaut. Et, en ce qui concerne la compatibilité avec la relativité, les problèmes rencontrés par la théorie de Bohm sont essentiellement les mêmes que ceux que rencontrerait toute théorie qui ferait des prédictions correctes¹⁸.

3- Conclusions

Je laisserai le dernier mot à John Bell, l'un des plus lucides défenseurs de la théorie de Bohm. Il explique que, lorsqu'il était étudiant, il avait lu le livre de Born [6], où, sur la base d'une mauvaise compréhension de la signification du théorème sur les variables cachées de von Neumann, il était déclaré qu'une théorie déterministe sous-jacente à l'algorithme quantique était impossible¹⁹. Mais, comme il le dit, « en 1952, je vis l'impossible accompli » ; et c'était la théorie de Bohm. Il continue : « Mais alors pourquoi Born ne m'avait pas parlé de cette « onde-pilote » ? Ne serait-ce que pour signaler ce qui n'allait pas avec elle ? Pourquoi von Neumann ne l'a pas envisagée ? Plus extraordinaire encore, pourquoi des gens ont-ils continué à produire des preuves d'impossibilité, après 1952, et aussi récemment qu'en 1978 ? Alors que même Pauli, Rosenfeld, et Heisenberg, ne pouvaient guère produire de critique plus dévastatrice de la théorie de Bohm que de la dénoncer comme étant « métaphysique » et « idéologique » ? Pourquoi l'image de l'onde-pilote est-elle ignorée dans les cours ? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique solution, mais comme un antidote à l'auto-satisfaction dominante ? Pour montrer que le flou, la subjectivité, et l'indéterminisme, ne nous sont pas imposés de force par les faits expérimentaux, mais proviennent d'un choix théorique délibéré ? »

¹⁸ Voir [3] (chap. 19), [12], [21] pour une discussion plus détaillée de la relativité et des théories du champ quantique bohmien.

¹⁹ Voir [17] pour de nombreux exemples d'incompréhensions de la signification de ce théorème, incompréhensions qui remontent à von Neumann lui-même.

Références

- 1- A.Aspect, J.Dalibard, G.Roger, Phys.Rev.Lett. 49, 1804 (1982).
- 2- J.S.Bell, « Bertlmann' socks and the nature of reality », Chapitre 16 dans [3].
- 3- J.S.Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge 1987.
- 4- J.Bernstein, Quantum Profiles, Princeton University Press, Princeton (1991).
- 5- D. Bohm, "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variables", Parts 1 and 2, Phys. Rev. 89, (1952) p. 166-193.
- 6- M. Born, Natural Philosophy of Cause and Chance, Clarendon, Oxford (1949).
- 7- M.Born (ed.), The Born-Einstein Letters, Macmillian, Londres (1971).
- 8- H.Broch, Au cœur de l'extraordinaire, l'Horizon chimérique, Bordeaux (1992).
- 9- M. Daumer, D.Dürr, S.Goldstein, N.Zanghi, « Naive realism about operators », Erkenntnis 45, (1996) 379-397, quant-ph/9601013.
- 10- P.C.W.Davies, J.R.Brown (eds), The Ghost in the Atom (BBC interviews), Cambridge University Press, Cambridge 1989.
- 11- D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, "Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty", J. Stat. Phys. 67 (1992) 843-907
- 12- D. Dürr, S. Goldstein, K. Münch-Berndl, N. Zanghi, „Hypersurface Bohm- Dirac Models“, Phys. Rev. A 60, (1999) 2729-2736, quant-ph/9801070
- 13- A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can quantum mechanical description of reality be considered complete?", Phys. Rev. 47 (1935) 777-780.
- 14- M. Gardner, The New Age, Notes of a Fringe Watcher, Prometheus Books, Buffalo (1988).
- 15- M. Gell-Mann, The Quark and the Jaguar, Little, Brown and Co., London (1994).
- 16- S. Goldstein, Bohmian, "Mechanics and the Quantum Revolution", Synthese 107,145-165 (1996).
- 17- S. Goldstein, "Quantum Philosophy: The Flight from Reason in Science, contribution to The Flight from Science and Reason", P. Gross, N. Levitt, and M.W.Lewis, eds., Annals of the New York Academy of Sciences 775,119-125 (1996), quant-ph/9601007
- 18- S. Goldstein, "Quantum theory without observers", Physics Today, March 1998 (p. 42-46)-April 1998 (p. 38-42) ; voir aussi Physics Today, Letters, February 1999 (p. 11).
- 19- D. Greenberger, M.Horne, A.Shimony, Z.Zeilinger, Am.J. of Phys. 58, 1131 (1990).
- 20- N. Herbert, Quantum Reality, Anchor Press, Garden City (1985).
- 21- T. Maudlin, Quantum Non-Locality and Relativity, Blackwell, Cambridge (1994).
- 22- D. Mermin, Physics Today, Avril 1985.
- 23- D. Mermin, Boojums All the Way Through, Cambridge University Press, Cambridge 1990. 22 - A.Pais, Rev.Mod.Phys. 51, 863 (1979).
- 24- R. Penrose, The Emperor's New Mind, Oxford University Press, Oxford 1989.
- 25- H. Stapp, Nuovo Cimento 40b, 191 (1987).

Collège de physique et de philosophie
Séance du 3 octobre 2011

<http://www.cphi2.org/Portals/4/CR%203%20Oct%202011.pdf>

Bernard d'Espagnat.

Notre groupe de réflexion sur les apports de la physique contemporaine à la théorie de la connaissance entame sa deuxième année d'existence et j'ai le plaisir de saluer la présence aujourd'hui parmi nous d'Alain Aspect et de Michel Le Bellac, venus écouter Franck Laloë afin d'en savoir plus encore relativement à la théorie de Louis de Broglie et David Bohm. Il va sans dire que nous sommes très heureux de cette présence et serons ravis de la voir se renouveler.

Franck Laloë a gentiment accepté de nous éclairer sur cette vieille théorie, qui a la vertu rare d'être ontologiquement interprétable et qui, malgré cela, ne séduit pas grand monde, il faut bien le dire, parmi nous – sans que nous sachions toujours précisément pourquoi. L'exposé d'aujourd'hui et la discussion qui suivra nous permettront peut-être d'avancer un peu dans la résolution de cette énigme. Cher Franck, vous avez la parole.

**LA THÉORIE DE L'ONDE PILOTE DE LOUIS DE BROGLIE ET DAVID
BOHM**

Exposé de Franck Laloë

Franck Laloë. Merci beaucoup. Je suis ravi de prendre la parole et de me faire le défenseur de la théorie de Broglie Bohm (dBB) pendant la durée de cet exposé.

Après l'introduction générale, je voudrais rappeler le principe général de cette théorie en partie 1. Vous la connaissez probablement tous, mais il n'est pas mauvais de commencer par un petit rappel. Je parlerai ensuite en partie 2 des trajectoires bohmiennes, qui présentent quelques particularités curieuses et intéressantes. Le point 3 portera sur la mesure en théorie de Bohm, qui me semble un des points forts et particulièrement intéressant de la théorie dBB. En partie 4, je parlerai très rapidement de la théorie des champs. Jusque là, je me ferai l'avocat de la théorie dBB, en essayant de vous convaincre de mon mieux qu'elle rencontre beaucoup de succès et qu'elle présente de nombreux avantages. A partir du point 5, j'apporterai des nuances à ce point de vue et j'expliquerai, pour finir, pourquoi, à mon sens, elle ne fait pas autant que ce qu'on aurait pu espérer.

Je vous propose quelques références, en précisant que j'ai été un peu embarrassé concernant celles de de Broglie ; il a beaucoup publié de petites notes au contenu extrêmement court, où il explique ses idées sur tel ou tel phénomène. Il n'existe pas beaucoup de textes complets dans lequel il donne une vue générale sur sa théorie. Je propose cependant : L. De Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement », J. Physique et le Radium, série VI, tome VIII, 225 (1927); « Tentative d'interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire », Gauthier Villars (1956).

Je citerai ensuite les deux articles de Bohm, que beaucoup d'entre vous connaissez : D. Bohm, « *A suggested interpretation of quantum mechanics in terms of 'hidden' variables* », I and II, Phys. Rev. 85, 166 et 180 (1952).

Je recommande vivement un ouvrage relativement récent, en particulier pour ses illustrations : P. R. Holland; « *The quantum theory of motion* », Cambridge University Press (1993).

Il existe également un très grand nombre d'articles sur la théorie dBB, en particulier dans ArXiv, dont certains sont intéressants, d'autre moins, d'autres faux. Parmi els bons auteurs, S. Goldstein notamment, l'un des grands chantres de cette théorie qui a écrit de nombreux articles.

Au cours de l'exposé je parlerai d'un article relativement connu d'Englert, Scully, Süssmann et Walter : « *Surrealistic Bohm trajectories* », *Z. Naturforschung* 47a, 1175 (1992). C'est un article critique sur la théorie dBB, qui ne remplit pas à mon avis son objectif critique, mais qui reste très intéressant à mon sens.

La mécanique quantique pose des problèmes d'interprétation difficiles – sinon, notre groupe de réflexion n'existerait pas. Nous sommes d'accord là-dessus ! L'approche de la théorie dBB n'est pas du tout de chercher à les éviter. Au contraire, elle vise vraiment à « prendre le taureau par les cornes ». Elle parle vraiment des « choses qui existent » et ne suit aucune stratégie d'évitement ou d'interdiction à la Bohr. C'est vraiment, de ce point de vue, une approche extrêmement directe et intéressante.

Comme l'a très bien dit Bernard d'Espagnat, il est souvent de bon ton de rejeter la théorie dBB, parce qu'on la considère vieille, dépassée, certains diront inesthétique, réactionnaire... On entend beaucoup de qualificatifs. Cela dit, en fait, peu de physiciens se sont donné le mal de vraiment l'étudier. Ce qui me frappe, c'est que dans la littérature on trouve un nombre impressionnant de réfutations de la théorie dBB qui illustrent surtout l'incompréhension que leurs auteurs ont de cette théorie, plus qu'une véritable réfutation. Typiquement, les auteurs utilisent une espèce de mélange à leur idée de la théorie dBB et de la mécanique quantique standard, et arrivent à l'idée que « cela ne colle pas ». Nous y reviendrons, et nous verrons que la critique ne s'applique généralement pas à la véritable théorie dBB, mais à une version hybride inventée pour l'occasion par l'auteur.

Beaucoup d'entre vous connaissez et avez déjà utilisé la citation de Feynman : « *We choose to examine a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery. We cannot make the mystery go away by explaining how it works.* ». Ce faisant, Feynman décrit le phénomène d'interférence particule par particule, et considère que c'est vraiment le grand mystère de la mécanique quantique, que personne ne peut expliquer. Les bohmiens ou les néo-bohmiens en sourient, puisque pour eux, la situation est presque triviale et ne présente aucun grand mystère particulier.

Alain Aspect. Me permettez-vous d'apporter un commentaire ?

Franck Laloë. S'il vous plait.

Alain Aspect. Vingt ans plus tard, Feynman a affirmé qu'il existait un deuxième mystère dans la physique quantique, qui s'appelle l'intrication.

Franck Laloë. Et qui est peut-être plus profond que le premier, d'ailleurs.

Alain Aspect. La citation que vous rappeliez est tirée d'un article rédigé à la fin des années 50. Vingt ans plus tard, dans l'article de 1982 qui est considéré comme l'article fondateur de l'information quantique, Feynman écrit explicitement qu'il existe un deuxième mystère qu'il a essayé toute sa vie de résoudre mais qui demeure : l'intrication. Quand j'ai commencé des expériences sur les inégalités de Bell, tout le monde me disait « c'est la dualité en deux particules, on connaît, on sait que c'est le problème fondamental de la mécanique quantique ». Grâce à vous, Franck, en particulier, j'avais compris que c'était d'une nature différente, c'est-à-dire que l'intrication était la dualité en deux particules, si j'ose dire, pour deux particules. J'apporte simplement ce commentaire. Feynman a certes écrit ce que vous venez de rappeler, « tout le mystère est là », mais ensuite, il a quand même accepté de « mettre de l'eau dans son vin », si j'ose dire.

Edouard Brézin. Si je prends la théorie sur la liaison à un électron, c'est l'intrication électronique qui crée la liaison entre les deux atomes. C'est quand même bien une intrication à un électron, non ?

Alain Aspect. Non. La meilleure preuve, comme nous le verrons dans l'exposé de Franck Laloë, est que la théorie dBB nous permet de donner une interprétation locale de phénomènes à une particule,

alors que si on cherche à donner des interprétations de phénomènes à deux particules, il n'y a plus d'interprétation locale. Nous pouvons en rediscuter.

Bernard d'Espagnat. La théorie de Bohm n'a jamais prétendue être locale.

Alain Aspect. Non, mais cela montre bien la nature différente des problèmes, me semble-t-il.

Suite de l'exposé

Franck Laloë. Ainsi que je l'ai indiqué à Bernard d'Espagnat, je ne suis pas particulièrement féru de la question, en particulier de la théorie de la « double solution ». Louis de Broglie l'a introduite juste après sa thèse. L'idée générale est que la fonction d'onde ne représente pas directement la particule, mais un champ qui guide son mouvement.

Dans un premier temps, la particule elle-même était représentée par une autre onde qui, elle, est une onde localisée. C'est une deuxième solution de la même équation. De Broglie considère que les deux ondes doivent se mettre en phase. L'onde de Schrödinger se propage selon l'équation linéaire que nous connaissons tous et la deuxième onde, l'onde singulière, qui représente la particule est une petite horloge qui oscille aussi – et le mouvement de ces deux ondes se fait de telle sorte que les phases des deux ondes se synchronisent.

Je n'ai personnellement pas compris si c'est une idée générale qui est proposée, ou si elle permet véritablement d'écrire un formalisme mathématique et des équations précises. Je ne comprends pas très bien comment l'équation de Schrödinger pourrait admettre des solutions localisées supplémentaires (la double solution), de sorte que j'imagine qu'il faut changer l'équation – ou alors le type de solution (une distribution ?). Toujours est-il que de Broglie devait être un peu mal à l'aise lui aussi, au moins en 1927 lorsqu'il a été invité à parler de sa théorie au fameux congrès Solvay. A cause de la difficulté mathématique de la théorie de la double solution, il a présenté une autre version « tronquée » (je ne fais que répéter ce qu'il a écrit- sinon je n'oserais pas le dire !)

Il a alors considéré qu'il valait mieux présenter une théorie plus simple, en remplaçant la deuxième onde par une position à une particule. C'est là qu'il a inventé la théorie de l'onde pilote, qui est celle qu'il a présentée au congrès Solvay avec un succès modéré, comme vous le savez. Il semble même que personne n'ait été convaincu. Rétrospectivement, ce qui est amusant, c'est que constater que c'est souvent pour les mauvaises raisons. Quand Pauli avait vivement attaqué la théorie de de Broglie, il avait avancé des arguments concernant les collisions inélastiques dont la théorie de l'onde pilote serait incapable de rendre compte. Si on y réfléchit maintenant, ces arguments ne tenaient pas. Mais, à l'époque, l'équivalence entre les prédictions des divers formalismes et leurs relations n'était pas bien claire !

Puis, en 1952, Bohm (qui ne connaissait pas le travail de de Broglie) a proposé une théorie très proche de la deuxième version de la théorie de l'onde pilote. J'ai appris tout récemment que Bohm était un physicien américain. J'ai longtemps cru qu'il était britannique et même londonien. Il a fait sa thèse à Berkeley, avec Oppenheimer comme patron. Extrêmement brillant, il avait fait des calculs sur les collisions de protons et de deutérons. Mais, à l'époque, on mettait au point la bombe nucléaire. Son travail a alors été immédiatement classifié. Du fait de ses opinions politiques, il n'avait pas accès aux documents classifiés – son travail de thèse s'est donc immédiatement trouvé en dehors de sa portée. On lui a même interdit de rédiger son mémoire de thèse. Ensuite, ce jeune physicien a connu des tribulations assez compliquées. Il a été courageux du temps du maccarthysme, en refusant de dénoncer des collègues, ce qui lui a valu de perdre son poste à Princeton. Il est alors parti en Amérique du Sud, avant de s'établir en Angleterre où il a fini sa carrière.

Alain Aspect. Puis-je vous rapporter un témoignage de presque première main ? Il a été professeur à Rio de Janeiro. Moses Nussenzweig, que nous connaissons tous, raconte volontiers que lorsqu'il a suivi les cours de Bohm, ce dernier avait déjà changé de position sur la mécanique quantique par rapport à son livre, qui est un livre standard de mécanique quantique. Nussenzweig raconte que,

c'était tout à fait étonnant, en parlant de son livre Bohm disait « dans son livre, il dit que... », « il » étant lui-même, c'est-à-dire le Bohm de la mécanique quantique standard. Il avait clairement changé de point de vue par rapport à celui qui avait écrit le livre, qui était lui-même. Cette histoire est tout à fait intéressante !

Michel Bitbol. Il a même changé d'avis une troisième fois, en s'inscrivant en faux contre sa théorie de 1952. Il a proposé, à la place, une théorie holistique dans laquelle les trajectoires de particules ne sont que des apparences.

Alain Aspect. En tout cas, il est intéressant d'avoir au moins un témoignage direct des cours de Bohm.

Gravitation and Electromagnetism Conciliated Following Einstein's Program

Claude Elbaz

Academie Europeenne Interdisciplinaire de Science (A.E.I.S.), Paris, France
Email: claudio.elbaz@science-inter.com

Received 20 February 2015; accepted 24 April 2015; published 27 April 2015

Copyright © 2015 by author and Scientific Research Publishing Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The Einstein's program permits to conciliate gravitation and electromagnetism. Besides the standard model, it forms a consistent system for universe description, founded upon a scalar field propagating at the speed of light c . Matter corresponds to standing waves. Adiabatic variations of frequencies lead to electromagnetic interaction constituted by progressive waves. Classical domain corresponds to geometrical optics approximation, when frequencies are infinitely high, and then hidden. As interactions for matter, Gravitation and Electromagnetism derive from variations of its energy $E = mc^2$. Electromagnetic interaction energy derives from mass variation $dE = c^2dm$, and gravitation from speed of light variation $dE = mdc^2$. Contrarily to gravitation, only electromagnetic interaction serves as a bridge between classical and quantum frames, since it leans directly upon the wave property of matter: its energy $dE = h\nu = c^2dm$ derives from variations of matter energy $E = h\nu = mc^2$.

Keywords

General Relativity, Gravitation, Electromagnetism, Adiabatic Invariant, Standard Model, Quantum Physics, Classical Physics

1. Introduction

The conciliation of gravitation with electromagnetism is one of the most present resisting problems in physics. The main difficulty lies in the fact that, until now, gravitation is still described by general relativity, in a classical and determinist framework, while electromagnetism, incorporated in the standard model, is described by a quantum field, in a probabilistic framework.

For the physicists, the whole universe is nowadays theoretically described by the standard model, which forms a consistent system. It is constituted by matter interacting through three different kinds of forces. All are

composed of fundamental particles which derive from relativist quantum fields, and behave either as waves or as particles. The standard model has been validated in 2012 by the B.E.H, or Higgs, boson detection, representing its crowning. Since it does not include gravitation, it describes only a partial aspect of the universe. It is admitted as posterior to Planck's era.

By comparison, gravitation is well described by general relativity, based on a continuous field [1]-[5]. It has been largely confirmed by numerous experiments and by its theoretical consequences and practical applications. The graviton, as the quantum particle mediating for gravitation interaction, has not yet been detected and validated [6] [7]. Consequently, until having proof to the contrary, gravitation remains well described by general relativity, in a classical framework.

In extension of general relativity and of his different discoveries, including in quantum physics, such as the stimulated emission, Einstein had proposed a consistent approach for physics, symmetrical to the standard model [1]. He privileged a continuous field, leaning on physical representations of phenomena, before their more precise mathematical description.

It has been supported, and validated, by the International Legal Metrology Organization. In one hand, the speed of light in vacuum is admitted as a "pure", or primary, fundamental constant in experimental physics, with its numerical value strictly fixed. In other hand, the standard for measures of time is based on the period an electromagnetic oscillation.

In a previous article [8], we showed how the Einstein's program forms a consistent system for universe description, beside the standard model. It allows us to complete the universe grasp, like both eyes give us access to tridimensional vision, or both ears to stereophonic audition. It founds upon a scalar field propagating at light velocity. Matter corresponds to standing waves, and electromagnetism, as a quantum interaction, to their adiabatic variations. Classical domain restricts to the geometrical optics approximation, when frequencies are infinitely high, and then hidden [9]-[12].

In this article we propose to show how the Einstein's program permits to conciliate gravitation and electromagnetism. Since both act as interactions of matter, they derive from variations of its energy $E = mc^2$. Electromagnetic interaction energy corresponds to the mass variation $dE = c^2 dm$, while gravitation energy is linked to variation of the light velocity $dE = mdc^2$. Contrarily to gravitation, only electromagnetic interaction energy $dE = h\nu = mdc^2$, derives directly from the wave character of matter with $E = h\nu = mc^2$, as an adiabatic variation.

2. History

The historical development of interaction properties of matter with gravitation, and of interaction properties of charges with electromagnetism, showed from the beginning, how they were all closely linked together.

Gravitation was the first interaction, discovered and formalized in the 17th century. The Newton's attractive force

$$F = Gmm'/r^2 \quad (1)$$

exerted between two localized masses m , m' , separated by a distance r , introduced in physics the concept of force, applied respectively to point-like gravity centers, together with the concept of particle. Afterward, one century later, the problem of harmonizing electromagnetism began to arise, when the Coulomb's force

$$F = kqq'/r^2 \quad (2)$$

between electric charges q , q' , revealed similar to (1), beyond the fact that it is attractive or repulsive, depending the signs of the charges. Both equations form parts of the same Newtonian field, acting instantaneously between two point particles in vacuum. In addition, the charges have necessarily matter as support.

Special Relativity replaced the instantaneous action at a distance between particles, by an action propagating at speed of light c , emphasizing that it occurred in vacuum. Henceforth, the speed of light plaid a fundamental role in physics, particularly in the space-time framework, as a link between space and time coordinates.

However, in spite of its extension feature, in Einstein's equation of General Relativity,

$$R_{ij} - g_{ij}R/2 = \chi T_{ij} \quad (3)$$

the local variations of space-time properties, characterized by the metric tensor g_{ij} , leading to a curvature R , prevented to maintain it still empty. (Despite its usefulness, we did not consider the cosmologic constant Λ , since the additional term $g_{ij}\Lambda$ may figure either in any side, according to its physical consequences). The left

side of (3), which is the principal feature of the theory, describes the gravitation properties of space-time, through a classical continuous field propagating at light velocity c , as resulting from the tensors g_{ij} and its derivative R_{ij} . They arise themselves from the matter-energy tensor T_{ij} of the right side, acting as sources, globally in motion with a speed v strictly inferior to c , and gathering different phenomenological and theoretical properties of matter-energy, through masses and interactions.

Einstein's equation law for gravitation (3) derives directly as an extension of Newton's law (1). (It is known that (1) arises as an approximation of (3), remaining largely sufficient for usual terrestrial, and even spatial, applications for moving matter. It becomes insufficient for GPS because it concerns electromagnetic rays propagation). Nevertheless, passing over from (1) to (3) was conditioned by the transformation of Coulomb's equation (2) on behalf of static Poisson's equation $\Delta V = -4\pi\rho$ for electricity, after introducing a space-distributed potential V in place of force F , and continuous charge density ρ , in place of point-like charge q . It led to the Maxwell's equations. According to Einstein, "The formulation of these equations is the most important event in physics since Newton's time, not only because of their wealth of content, but also because they form a pattern for a new type of law... The characteristic features of Maxwell's equations, appearing in all other equations of modern physics, are summarized in one sentence. Maxwell's equations are laws representing the structure of the field." [2]. Nowadays, it still appears that, "One could believe that it would be possible to find a new and secure foundation for all physics upon the path which had been so successfully begun by Faraday and Maxwell. Accordingly, the revolution begun by the introduction of the field was by no means finished" [1].

At the present time, in view of physics unification into the standard model of particles, gravitation remains, after almost one century of efforts, the last one to be quantified, in order to rejoin the three others. Einstein's Equation (3) gathers together separately in either side, without fusing them, not only gravitation and electromagnetism but also opposite entities, like fields propagating at light velocity c , and localized matter-energy.

This is why, despite of his awareness of general relativity achievement, Einstein was "dissatisfied with the dualism of a theory admitting two kinds of fundamental physical reality: on the one hand the field and on the other hand the material particles. It is only natural that attempts were made to represent the material particles as structures in the field, that is, as places where the fields were exceptionally concentrated. Any such representation of particles on the basis of the field theory would have been a great achievement... This theory having brought together the metric and gravitation would have been completely satisfactory of the world had only gravitational fields and no electro-magnetic fields. Not it is true that the latter can be included within the general theory of relativity by taking over and appropriately modifying Maxwell's equations of the electro-magnetic field, but they do not then appear like the gravitational fields as structural properties of the space-time continuum, but as logically independent constructions. The two types of field are causally linked in this theory, but still not fused to an identity." [1].

3. The Einstein's Program

In extension of general relativity and of his different discoveries, including in quantum physics, such as the stimulated emission, Einstein had proposed a consistent approach for physics, which appears at the present time, as symmetrical to the standard model: "We have two realities: matter and field... We cannot build physics on the basis of the matter concept alone. But the division into matter and field is, after the recognition of the equivalence of mass and energy, something artificial and not clearly defined. Could we not reject the concept of matter and build a pure field physics?... We could regard matter as the regions in space where the field is extremely strong. In this way a new philosophical background could be created... Only field-energy would be left, and the particle would be merely an area of special density of field-energy. In that case one could hope to deduce the concept of the mass-point together with the equations of the motion of the particles from the field equations—the disturbing dualism would have been removed... One would be compelled to demand that the particles themselves would everywhere be describable as singularity free solutions of the completed field-equations. Only then would the general theory of general relativity be a complete theory." [1].

As a general manner, new technologies evolve in accordance with the Einstein's program, when they are substituting, progressively and almost systematically, mechanical devices by electronic devices, based upon electromagnetic field in place of matter. For instance, instead of printing documents on paper, they are rather numerically recorded. What is more specific is that, decades after the Einstein's program was set, physicists had begun to bring it into effect, when they replaced international standards of length and time, based on matter

since two centuries, by electromagnetic standards, based on the period of a continuous field propagating at the speed of light. As far back as 1905, when Einstein established special relativity theory, he used a light ray, and not a material rod, to measure the distance of a moving body. He anticipated the international standard of length adopted in 1960 by the International Legal Metrology Organization. Now it derives from the second, defined by the radiation period of the cesium 133 atom, and by, the speed of light in vacuum, admitted as fundamental, with its numerical value strictly fixed. This allows to measure durations with 10^{-18} precision. Such measures, carried out by electromagnetic frequencies reduction ratio, are the more precise in physics at the present time [13] [14].

Thus, not only the Einstein's program gave numerous proofs of its validity, but it presents itself as precise means to investigate the problem of gravitation and electromagnetism conciliation. The more especially as gravitation has strongly resisted to its quantification, since almost one century. For this purpose we point out two of their main characteristic features.

The first one is explicit in the program, and was emphasized by Einstein since 1905 in special relativity: the speed of light c . Its basic role in whole experimental and theoretical physics has been legally confirmed in international standards, as a "pure" or primary fundamental constant, with its value numerically fixed. It is the speed of propagation in vacuum for gravitation and electromagnetism interactions. On another hand, the legal standard of time leans on a frequency of oscillation of a field propagating at the speed of light.

4. Electromagnetism and Special Relativity

4.1. Standing Field Kinematics

In previous works [15] [16], we showed how kinematic properties for standing waves of a scalar field propagating at light velocity c , with constant frequency ω and velocity v , are formally identical with mechanic properties of isolated matter. The Lorentz transformation, which plays a fundamental role in special relativity, is specific of standing waves.

Starting from a scalar field ε propagating at light velocity c , we are assured that all following consequences are relativistic. The general harmonic solutions of the d'Alembertian's equation

$$\varepsilon = \Delta\varepsilon - (1/c^2)(\partial^2\varepsilon/\partial t^2) = 0, \quad \partial^\mu\partial_\mu\varepsilon = 0 \quad (4)$$

may be reduced to two kinds of elementary ones, according to their kinematic, or their geometric, properties. In the first case, we find progressive waves propagating at speed of light in opposite direction, like $\cos(\omega_0 t_0 \pm k_0 x_0)$, and standing waves with separated variables x_0 , t_0 , and distinct functions of space $u_0(k_0 x_0)$, and of time $\psi_0(\omega_0 t_0)$, $\varepsilon_0(x_0, t_0) = u_0(k_0 x_0)\psi_0(\omega_0 t_0) = \cos(\omega_0 t_0)\cos(k_0 x_0)$, with frequency $\omega_0 = k_0 c$. Since they oscillate locally, they define then a rest system for coordinates (x_0, t_0) . Since the functions $u(k_0 x_0)$ and $\psi_0(\omega_0 t_0)$ are independent, the frequency ω_0 is necessarily constant in $(1/u_0)\Delta_0 u_0 = (1/\psi_0)(\partial^2\psi_0/c^2\partial t_0^2) = -k_0^2 = -\omega_0^2/c^2 = \text{constant}$. Progressive and standing waves can be considered either as basic, or as composed from others since

$$\cos(\omega_0 t_0 + k_0 x_0) + \cos(\omega_0 t_0 - k_0 x_0) = 2\cos(\omega_0 t_0)\cos(k_0 x_0), \quad (5)$$

$$\cos(\omega_0 t_0)\cos(k_0 x_0) + \sin(\omega_0 t_0)\sin(k_0 x_0) = \cos(\omega_0 t_0 - k_0 x_0) \quad (6)$$

when the frequencies of opposite progressive waves are different in a system of reference (x, t) ,

$$\cos(\omega_1 t - k_1 x) + \cos(\omega_2 t + k_2 x) = 2\cos(\omega t - \beta k x)\cos(kx - \beta \omega t), \quad (7)$$

by identification with (5), they form a standing wave with main frequency $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$ at rest. It becomes $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2 = kc$, when in motion with a speed $v = \beta c = (\omega_1 - \omega_2)/(\omega_1 + \omega_2)c$, leading to the Lorentz transformation between the systems of reference (x_0, t_0) and (x, t) , and to its whole consequences.

The geometric properties of standing waves are described by the function of space $u(k_0 x_0)$, obeying Helmholtz's equation $\Delta_0 u_0 + k_0^2 u_0 = 0$. Its solutions verify Bessel spherical functions, and particularly its simplest elementary solution, with spherical symmetry, finite at origin of the reference system, and representing a lumped function,

$$u_0(k_0 r_0) = (\text{sinc } k_0 r_0)/(k_0 r_0), \quad (8)$$

In geometrical optics approximation, when the frequency is very high and tends towards infinity $\omega_0 = k_0 \rightarrow \infty$, the space function u_0 tends towards Dirac's distribution $u_0(k_0 r_0) \rightarrow \delta(r_0)$. The standing wave of the field behaves

as a free classical material particle isolated in space.

From a kinematical point of view, the central extremum of an extended standing wave, either at rest or in motion, is appropriate to localize its position x_0 , exactly like the centre of mass for a material system. It verifies

$$\nabla_0 u_0(\mathbf{x}_0) = 0. \quad (9)$$

The four-dimensional Minkowski's formalism traduces invariance properties of standing waves at rest, when they move uniformly. Confirmation is found into invariant quantities obtained from four-quantities, such as coordinates $x_\mu x^\mu = x_0^2$ or $x_\mu x^\mu = c^2 t_0^2$, and functions $u_\mu u^\mu = u^2(x_0)$ or $\psi_\mu \psi^\mu = \psi^2(t_0)$. Their space-like or time-like characters are absolute, depending of their referring quantities defined in the rest system, in which the separation with respect to space or time occurs.

In order to point out their constant frequency, we express them as

$$\varepsilon(\omega t, \mathbf{kx}) = u(\mathbf{kx}, \beta\omega t) \exp(i(\omega t - \beta\mathbf{kx})) \quad \phi = \omega t - \beta\mathbf{kx} \quad (10)$$

In special and general relativity, the equations are based on particles, as singularities, moving on trajectories. They lean then directly upon geometrical optics approximation. The periodic equations, generic of standing fields, are hidden. The space coordinates x_α , involved in the metric, are point-like dynamical variables, and not field variables r which would describe an extended repartition in space.

4.2. Standing Field Dynamics

All above equations are unlimited with respect to space and time, since x or t may become infinite. Usually, one imposes boundary conditions, in which matter acts either as a source fixing the frequency ω , or as a detector annealing it, as well as a geometrical space boundary fixing the wavelength λ through $k = 2\pi/\lambda$. This is not felicitous from relativistic consistency, since space and time operate separately. In addition, matter is heterogeneous with regard to field. In order to remain in homogeneous frame, we rather consider boundaries provided by wave packets. Two progressive waves with different frequencies ω_1, ω_2 propagating in the same direction at light velocity, give rise to a wave packet propagating in the same direction at light velocity, with a main wave with frequency $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$, modulated by a wave with frequency $\beta\omega = (\omega_1 - \omega_2)/2 = \Delta\omega/2 = \Delta kc/2$ and wavelength $\Lambda = 2\pi/\beta k$ and period $T = \Lambda/c$. Since $\beta < 1$, the modulation wave acts as an envelope with space and time extensions $\Delta x = \Lambda/2, \Delta t = T/2$, leading to well known Fourier relations $\Delta x \Delta k = 2\pi$ and $\Delta t \Delta \omega = 2\pi$.

Then, Fourier relations represent homogeneous boundary conditions for the scalar field ε . From a physical point of view, they must be compulsory associated with the d'Alembertian's Equation (4) in order to complete them, and to emphasize that the field cannot extend to infinity with respect to space and time.

When the frequencies difference $\beta\omega = (\omega_1 - \omega_2)/2 = \Delta\omega/2 \ll \omega$ is very small, it can be considered as a perturbation with respect to the main frequency, $\beta\omega = \delta\omega$. Then a wave packet can be assimilated to a progressive monochromatic wave with frequency $\Omega = \omega \pm \delta\omega$, inside the limits fixed by the component frequencies $\omega_1 = \omega + \delta\omega$ and $\omega_2 = \omega - \delta\omega$. By difference with standing waves frequencies, which must be constant and monochromatic, progressive fields solutions of (4), may be more complex, with frequencies varying with space and time. An almost monochromatic wave is characterized by a frequency $\Omega(x, t)$, varying very slowly around a constant ω

$$\Omega(x, t) = K(x, t)c = \omega \pm \delta\Omega(x, t) \quad \delta\Omega(x, t) \ll \omega \quad \omega = \text{constant}. \quad (11)$$

From a physical point of view, we recognize the definition of an adiabatic variation for the frequency [17]. We can then expect that all following properties of almost fields occur inside such a process. Instead of admitting constant frequencies ω of elementary waves propagating all over space-time as given data, we rather consider that it represents the mean value, all over the field, of different varying frequencies $\Omega(x, t)$. In other words, the modulation waves with perturbation frequency $\delta\Omega(x, t)$, propagating at light velocity, behave as interactions between main waves, leading that their frequency ω remains practically constant all over the space-time.

From a mathematical point of view, almost fields properties derive from monochromatic ones, through the variation of constants method (Duhamel principle). Accordingly, following (10), an almost standing wave obeys,

$$\varepsilon(x, t) = U(x, t) \exp(i\phi(x, t)) \quad \phi(x, t) = \Omega(x, t)t - \mathbf{K}(x, t)\mathbf{x} + 2n\pi, \quad (12)$$

where products of second order $\delta\Omega dt \approx 0$ and $\delta\mathbf{K} d\mathbf{x} \approx 0$, defined modulo 2π , are neglected at first order of ap-

proximation. This is equivalent to incorporate, in almost monochromatic solutions, the boundary conditions defined by Fourier relations.

$$d\phi(x, t) = \Omega(x, t)dt - \mathbf{K}(x, t)d\mathbf{x} \approx \omega dt - \mathbf{k}d\mathbf{x}. \quad U(x, t) = u(x, t) \pm \delta U(x, t) \quad (13)$$

According to (4), $\varepsilon(x, t)$ in (12) verifies,

$$\partial^\mu \partial_\mu U - U \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi = 0 \text{ or } \partial^2 U/c^2 \partial t^2 - \nabla^2 U - U[(\partial\phi/c\partial t)^2 - (\nabla\phi)^2] = 0 \quad (14)$$

$$\partial^\mu (U^2 \partial_\mu \phi) = 0 \text{ or } \partial(U^2 \Omega)/c^2 \partial t + \nabla(U^2 \beta \mathbf{K}) = 0 \quad (15)$$

These relations apply to progressive waves for $\beta = \pm 1$, to standing waves at rest for $\beta = 0$ and in motion for $\beta < 1$, to monochromatic waves for ω and \mathbf{k} constant, to almost monochromatic waves for varying $\Omega(x, t)$ et $\mathbf{K}(x, t)$.

They lead to dynamical properties for energy-momentum conservation, and to least action principles, for standing fields and almost standing fields [9]-[12].

For a standing wave, either at rest or in motion, the frequency is constant $\delta\Omega(x, t) = 0$, so that (15) reduces to

$$\partial u_0^2 / \partial t_0 = 0. \quad \partial u^2 / \partial t + \nabla u^2 \mathbf{v} = 0 \text{ or } \partial_\mu w^\mu = 0 \quad (16)$$

where $w^\mu = (u^2, u^2 \mathbf{v}/c) = u_0(x_0)^2 (1, \mathbf{v}/c) / \sqrt{(1-\beta^2)}$ is a four-dimensional vector. This continuity equation for u^2 is formally identical with Newton's equation continuity for matter-momentum density

$$\partial \mu / \partial t + \nabla \mu \mathbf{v} = 0. \quad \text{with } u^2 = \mu c^2, \quad (17)$$

We are then led to admit, by transposition, that u^2 represents the energy density of the standing field.

Following relations (8) and (9), in the spherical symmetry case, and for its kinematical behavior, the space function u_0 can be reduced to its point-like centre of energy density whose position x_0 is such that

$$\nabla_0 u_0^2 = 0 \quad \nabla u^2 + (\partial u^2 \mathbf{v}/c^2 \partial t) = 0 \quad \nabla \times \mathbf{v} = 0 \text{ or } \pi^{\mu\nu} = \partial^\mu w^\nu - \partial^\nu w^\mu = 0, \quad (18)$$

Since u^2 is a standing wave energy density spread in space, and then a potential energy density, $-\nabla u^2 = -\nabla w_p = \mathbf{F}$ is a density force, and $\partial u^2 \mathbf{v}/c^2 \partial t$ a density momentum. Then $\pi^{\mu\nu}$ is a four-dimensional force density.

Equation (18), where energy density w^μ is a four-dimensional gradient $\partial^\mu a$, is mathematically equivalent to the least action relation

$$\delta \int da = 0 \quad \delta \int \partial_\mu da = 0 \quad \text{with } w^\mu = \partial^\mu a. \quad (19)$$

When transposing the mass density $\mu = u^2/c^2$, and taking into account the two identities $\nabla P^2 = 2(\mathbf{P}\nabla)\mathbf{P} + 2\mathbf{P} \times (\nabla \times \mathbf{P})$ and $d\mathbf{P}/dt = \partial\mathbf{P}/\partial t + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{P}$ for c and \mathbf{v} constant, after integration with respect to space, we get the equation for matter

$$d\mathbf{p}/dt = -\nabla m c^2 + \{\nabla(mv)^2\}/2m \quad d\mathbf{p}/dt = \nabla L_m = -\nabla m_0 c^2 \sqrt{(1-\beta^2)}. \quad (20)$$

We retrieve the relativistic Lagrangian of mechanics for free matter $L_m = -m_0 c^2 \sqrt{(1-\beta^2)}$ [18].

4.3. Electromagnetism

For of an almost standing wave, the continuity equation applies that the total energy density $W = U^2 \Omega = w + \delta W$, is sum of the mean standing wave w and of the interactions δW . The relations (18) become

$$\Pi^{\mu\nu} = \partial^\mu W^\nu - \partial^\nu W^\mu = 0 \text{ or } \Pi^{\mu\nu} = \pi^{\mu\nu} + \delta \Pi^{\mu\nu} = 0 \quad (21)$$

By difference with the null four-dimensional density force $\pi^{\mu\nu}$ for a standing wave, only the total density force $\Pi^{\mu\nu}$ for an almost standing wave vanishes. In the first case, this asserts the space stability of an isolated standing wave, while in the second case, the space stability concerns the whole almost standing wave. It behaves as a system composed of two sub-systems, the mean standing field with high frequency $\Omega(x, t) \approx \omega$, and the interaction field with low frequency $\delta\Omega(x, t)$, each one exerting an equal and opposite density force $\pi^{\mu\nu} = -\delta\Pi^{\mu\nu}$ against the other.

In (18), the vanishing four-dimensional force density tensor $\pi^{\mu\nu}$ of a standing wave, asserts that the energy-momentum density four-vector w^μ is four-parallel, or directed along the motion velocity \mathbf{v} . By comparison, for an almost standing wave, the total energy-momentum density tensor $\Pi^{\mu\nu}$ which still vanishes, asserts also that the total energy-momentum density four-vector W^μ is four-parallel, or directed along the motion velocity \mathbf{v} . However, the mean energy-momentum density tensor $\pi^{\mu\nu}$, no longer vanishes in (21) as previously in (18): the mean energy-momentum density four-vector w^μ is then no longer parallel. This comes from the opposite density force $\delta\Pi^{\mu\nu}$ exerted by the interaction.

It appears that an almost standing wave behaves as a whole system in motion which can be split in two sub-systems, the mean standing wave and the interaction field. Both are moving with velocity \mathbf{v} , while exerting each other opposite forces in different directions, including perpendicularly to the velocity \mathbf{v} . The perturbation field, arising from local frequency variations $\delta\Omega(\mathbf{x}, t)$, introduces orthogonal components in interaction density force and momentum.

The relations (20), generalized by the constants variation method for the mass $M(\mathbf{x}, t) = m \pm \delta M(\mathbf{x}, t)$, become

$$\nabla M c^2 + \partial P / \partial t = 0 \quad \nabla \times \mathbf{P} = 0 \quad dP/dt = -\nabla M c^2 + (\nabla P^2)/2M. \quad (22)$$

The density force $\delta\Pi^{\mu\nu} \neq 0$ exerted by the interaction is formally identical with the electromagnetic tensor $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu \neq 0$. We can set them in correspondence $\delta\Pi^{\mu\nu} = eF^{\mu\nu}$, through a constant charge e , in which $\delta M(\mathbf{x}, t) = eV(\mathbf{x}, t)/c^2$ and $\delta P(\mathbf{x}, t) = eA(\mathbf{x}, t)/c$. The double sign for mass variation corresponds to the two signs for electric charges, or to emission and absorption of electromagnetic energy by matter. We retrieve the minimum coupling of classical electrodynamics, $P^\mu(\mathbf{x}, t) = p^\mu + eA^\mu(\mathbf{x}, t)/c$, with $M(\mathbf{x}, t)c^2 = mc^2 + eV(\mathbf{x}, t)$, and $P(\mathbf{x}, t) = p + eA(\mathbf{x}, t)/c$ where electromagnetic energy exchanged with a particle is very small with respect to its own energy $eA^\mu(\mathbf{x}, t)/c = \delta P^\mu(\mathbf{x}, t) \ll p^\mu$ [18]. Electromagnetic interaction is then directly linked to frequencies variations of the field ε .

From (22) we derive then the relativistic Newton's equation for charged matter with the Lorentz force

$$dP/dt = -\nabla m_0 c^2 \sqrt{(1-\beta^2)} + e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{H}/c). \quad (23)$$

4.4. Adiabatic Invariance

For an almost standing wave, in place of (16), we get from (13) and (15), to first order approximation,

$$[\partial U^2 / \partial t + \nabla U^2 \mathbf{v}] / U^2 + \delta[\partial \Omega / \partial t + \nabla \Omega \mathbf{v}] / \Omega = 0 \quad \text{or} \quad (\partial_\nu W^\nu) / W + \delta(\partial_\nu \Omega^\nu) / \Omega = 0. \quad (24)$$

where $W = w \pm \delta W = \mu c^2 = \mu c^2 \pm \delta \mu c^2$ is energy density, $W^\nu = w^\nu \pm \delta W^\nu = (\mu c^2, \mu \mathbf{v} c)$ four-dimensional energy density, $\Omega = \omega \pm \delta \Omega$ the frequency and $\Omega^\nu = (\Omega, \Omega \mathbf{v} / c)$ the four-dimensional frequency. These relations imply that

$$W = I\Omega \quad \text{and} \quad W^\nu = I\Omega^\nu \quad (25),$$

when we take into account the double sign in frequency variation $\delta\Omega$. The constant I is an adiabatic invariant density. In first approximation, they reduce to energy-momentum densities, and to their variations, relations

$$w^\nu = I\omega^\nu \quad \text{or} \quad \mu c^2 = I\omega \quad \mu \mathbf{v} = I\beta \mathbf{k} \quad (26)$$

$$\delta W^\nu = I\delta\Omega^\nu \quad \text{or} \quad \delta \mu c^2 = I\delta\Omega \quad \delta \mu \mathbf{v} = I\delta\beta \mathbf{K} \quad (27)$$

Integrations of μ and I densities with respect to space, lead to relations between four-energy and four-frequency

$$E^\nu = (mc^2, \mathbf{p}c) = m_0 c^2 u^\nu = H\omega^\nu = H(\omega, \mathbf{k}c) = H\omega_0 u^\nu \quad u^\nu = (1, \mathbf{v}/c) \quad m_0 c^2 = H\omega_0 \quad (28)$$

through the adiabatic invariant H . Since the Planck's constant h behaves as an adiabatic invariant [17], these relations show h proximity with electromagnetism, more especially as they both lean upon slight frequency variations. However, their rigorous connections remain unsolved since h applies to all particles with different masses, while this does not seem to occur for H , after integration of I with respect to space. Consequently, even if, from historical point of view, Planck's constant h was introduced in direct connection with electromagnetism, through

black-body radiation, these relations pave only the way to a more complete approach.

5. Gravitation and General Relativity

All above, starting from the d'Alembertian Equation (4) for a scalar field ε propagating with a constant velocity c in vacuum, we derived almost standing waves properties, characterized in a rest system (x_0, t_0) by separated space and time variables $\varepsilon_0(x_0, t_0) = u_0(k_0x_0)\psi_0(\omega_0t_0)$, and a constant frequency $\omega_0 = k_0c$. The Lorentz transformation expresses that its stability remains in uniform motion with speed v .

Before its application to mechanics, and more generally to special relativistic physics, the Lorentz transformation determined the structure of Maxwell's equations in vacuum. The presence of matter, as support of electric charges, modifies locally the field properties, through induced dielectric and magnetic permeability variations, so that the field velocity propagation c is no longer constant, and must be written $C(x, t)$ [19].

Since localized standing waves behave like matter, we may expect that, as a secondary effect, their energy density $u^2 = \mu c^2$ modifies very slightly the field propagation velocity, so that it remains close to its vacuum constant value, becoming $C(x, t) = c \pm \delta C(x, t)$, with $\delta C(x, t) \ll c$. The relation $v = \beta c$ shows that the local variations of the motion velocity $V(x, t)$ must follow, leading to $V(x, t) = v \pm \delta V(x, t)$, with $\delta V(x, t) \ll v$. Consequently, the Lorentz transformation (1), in which the velocities v and c are constant, appears as expressing only a local approximation limit, from a more general form with varying velocities. In order to find it, we notice that in the relation $\omega = kc$, the varying field velocity c tends toward $C(x, t)$. It leads to varying frequency ω and wave vector k in $\Omega(x, t) = K(x, t)C(x, t)$. Then, in a rest system, space and time terms are no longer fully separated in expression $\varepsilon_0(x_0, t_0) = U_0(x_0, t_0)\Psi_0(x_0, t_0)$. The invariant interval $s^2 = c^2t_0^2 - x^2$, takes then the more general local form $ds^2 = g_{ij}dx^i dx^j$, introducing the formalism of general relativity, and leading to all its developments and consequences.

However, for almost standing waves, all quantities variations are very slight in comparison with their standing waves constant values. The Lorentz transformation remains locally verified for standing waves, as approximations of almost standing waves, when the velocity of propagation of the field $C(x, t)$ reduces to c .

Inversely, dynamical properties of almost standing waves arise from those of standing waves, through variation of constants method for velocities C and V , while the mass density $\mu = u^2/c^2$ of the standing wave limit remains unaffected in first approximation, according to (13) in the continuity Equation (16) written in the form (20)

$$d(\mu\mathbf{V})/dt = -\nabla\mu C^2 + \nabla(\mu V)^2/2\mu \quad \mu d\mathbf{V}/dt = -\mu\nabla(C^2 - V^2/2) \quad (29)$$

$$d\mathbf{V}/dt = -\nabla(C(x, t)^2 - V(x, t)^2/2) \quad d\mathbf{V}/dt_0 = -\nabla_0 C^2(x_0, t_0) = -\nabla_0 \Phi(x_0, t_0). \quad (30)$$

The acceleration of an almost standing wave, either at rest or in motion, is locally independent of its energy density, equivalent to mass density of matter. This characterizes gravitation interaction [18]. The gravitational potential $\Phi(x, t) = C^2(x, t)$ is formally identical with the square of the local velocity of propagation of the field.

The relations (29) are consistent with physical origin of gravitation, exposed in 1912 by Einstein, in a preliminary article on general relativity of 1915, on *Light velocity and static gravitation field*, [20]. He established the equation $\Delta c = 0$ in vacuum, generalizing the Poisson equation $\Delta\Phi = 0$ for the gravitation potential.

6. Gravitation and Electromagnetism Conciliation

By integration of mass density μ all over space, the relation (26) leads to general classical equation [7]

$$d\mathbf{P}/dt = -\nabla M C^2 + \nabla(MV)^2/2M. \text{ then } E_0 = M_0(x_0, t_0)C^2(x_0, t_0) = \text{constant} \quad (31)$$

when the mass M is constant, the variations of velocities, C of the field, and V of the matter, lead to the gravitation force in (28), and to the gravitational Lagrangian $L_G = -M\Phi(x, t) + Mv^2/2$, in an inertial frame of relativistic mechanics, which remains locally valid in general relativity [18]. When the velocities C of the field and V of the matter are constant, the variations $\delta M(x, t) = eV(x, t)/c^2$ of the mass M derive from electromagnetic interactions, leading to the relativistic mechanical Lagrangian of charged matter

$$d\mathbf{P}/dt = -M\nabla(C^2 - V^2/2) - (C^2 - V^2)\nabla M = -\nabla L_G - \nabla L_m = -\nabla L. \quad (32)$$

The total Lagrangian L , is then the sum of gravitational L_G and charged mechanical L_m Lagrangians.

$$dE_0 = d(M_0C^2) = M_0dC^2 + C^2dM_0 = dE_G + dE_m \quad dE^v = dE_G^v + dE_m^v \quad (33)$$

For matter at rest, and in uniform motion, interaction energies of electromagnetic charged matter dE_m and of gravitation dE_G , derive from its total energy $E_0 = M_0C^2$. However, contrarily to gravitation, only electromagnetic energy is quantified $dE_m = hd\Omega$, according to (28).

7. Concluding Remarks

Following Einstein's program, founded on a scalar field propagating at speed of light, one can derive main physical properties of matter and of gravitational and electromagnetic interactions. Matter corresponds to standing waves, while interactions correspond to progressive waves. When frequencies are infinitely high, they render oscillations inaccessible with time, since they are too rapid, and inaccessible with space, since the wavelengths are too small. Only mean effects appear. Physical phenomena exhibit then, theoretically and experimentally, as particles. Classical relativist equations of mechanics correspond to geometrical optics approximation.

In mechanics and electromagnetism domains, the very slight local variations, or local adiabatic variations, of almost standing waves frequency, lead to variations of energy density, or to equivalent mass density, while the field velocity c and motion velocity $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/t$, are locally constant. The underlying invariance structure with respect to motion, is expressed by local Lorentz transformation, with invariant interval $ds^2 = c^2dt_0^2 = c^2dt^2 - d\mathbf{x}^2$.

We retrieve then the main classical relativist relations for matter, such as the variational principle and the energy-momentum conservation laws, and particularly its energy $E = mc^2$. The variations of frequencies lead to the quantum relation $E = h\nu$ for matter (second quantification), and $dE = h\nu$ for electromagnetic interaction (first quantification), as well as to Fourier relations, homogeneous to the field, leading to the Heisenberg relations, homogeneous to matter. They lead also to an interaction which is formally identical with electromagnetism.

The variations of light velocity lead to an interaction, formally identical with gravitation. In gravitational domain, the whole equivalent mass of an almost standing wave, or the total mass of matter, including interaction energy, is submitted to local variations of the field velocity $C(x, t)$ and of motion velocity $V(x, t)$. The underlying invariance structure with respect to motion, is expressed by the local invariant interval $ds^2 = g_{ij}dx^i dx^j$, of general relativity.

The Einstein's program permits to conciliate gravitation and electromagnetism. Since they act as interactions of matter, both derive from variations of its energy $E = mc^2$: electromagnetism from mass m variation, and gravitation from light velocity c variation. Electromagnetism alone, but not gravitation, derives from the frequency ν variation of the matter energy $E = h\nu = mc^2$, leading to its quantification.

This would get an insight into theoretical difficulties encountered to incorporate gravitation in standard model of particles, and into experimental difficulties to detect the graviton as mediating quantum particle.

References

- [1] Einstein, A. and Infeld, L. (1938) *The Evolution of Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 228-232.
- [2] Einstein, A. (1936) *Journal of Franklin Institute*, **221**, 349-382. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-0032\(36\)91047-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-0032(36)91047-5)
- [3] Einstein, A. (1929) *Einstein's Theory of Relativity*.
- [4] Einstein, A. (1920) *The Aether and Relativity Theory*. Leyde University, Leyde.
- [5] Einstein, A. (1949) *Philosopher, Scientist*. Cambridge University Press, London.
- [6] Hello, P. (2008) *Classical and Quantum Gravity*, **25**, Article ID: 035002. <http://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/25/3/035002>
- [7] Blanchet, L. (2009) *Gravite Modifiee ou Matiere Modifiee?* <http://www2.iap.fr/users/blanchet/images/Astronomie>
- [8] Elbaz, C. (2014) *Journal of Modern Physics*, **5**, 2192-2199. <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2014.518213>
- [9] Elbaz, C. (1987) *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **20**, L279-L282. <http://dx.doi.org/10.1088/0305-4470/20/5/004>
- [10] Elbaz, C. (2013) *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **38**, 195-217.
- [11] Elbaz, C. (2010) *Asymptotic Analysis*, **68**, 77-88.
- [12] Elbaz, C. (2012) *Discrete and Continuous Dynamical Systems, A.I.M.S., Series B*, **17**, 835-849.
- [13] Dimarcq, N. (2013) *La mesure du temps*.

<http://www.planetastronomy.com/special/2014-special/05nov/Dimarcq-IAP.htm>

- [14] Dimarcq, N. (2014) *Academie Eurpeenne Interdisciplinaire de Sciences*, **187**, 4. <http://www.science-inter.com>
- [15] Salomon, C. (2014) La mesure du temps et les tests de la relativite. ENS, LKB.
- [16] Salomon, C. (2007) Quand les constantes n'en sont plus. CNES. *E-Espace et Science*.
<http://smc.cnes.fr/PHARAO/Fr/index.htm>
- [17] Landau, L. and Lifchitz, E. (1960) *Mechanics*. Pergamon.
- [18] Landau, L. and Lifchitz, E. (1962) *The Classical Theory of Fields*. Pergamon.
- [19] Born, M. and Wolf, E. (1970) *Principles of Optics*. Pergamon, 3.
- [20] Einstein, A. (1912) *Annal der Physik*, **4**, 355, 369.