

# EINSTEIN

1879–1955

Colloque du Centenaire

Collège de France

6-9 juin 1979

Organisé par le Ministère de la Culture et de la communication  
avec le concours du CNRS

EXTRAIT

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



REFLEXION SUR LE PROBLEME DE LOCALITE

M. Mugur-Schächter

UNIVERSITE DE REIMS

B.P. 347 51062 REIMS CEDEX

But

Depuis huit ans ce que l'on appelle le problème de localité retient de plus en plus l'attention. Des théoriciens, des expérimentateurs, des penseurs pluridisciplinaires investissent des efforts importants pour élucider ce problème. Les aspects techniques - mathématiques et expérimentaux - ont été déjà examinés dans un grand nombre de travaux et ils sont bien connus de ceux qui font à ce sujet des recherches spécialisées. Mais la configuration conceptuelle qui est en jeu me paraît avoir des contours beaucoup moins définis. Le but de l'exposé qui suit est d'examiner cette configuration conceptuelle. J'essaierai de procéder à cet examen d'une manière aussi simple et frappante que possible, presque affichistique, à l'aide de schémas et de tableaux. Ces moyens me paraissent être les plus adéquats pour donner le maximum de relief aux insuffisances que je perçois dans la définition même du problème de localité.

Bref rappel

Le paradoxe EPR (1935). Le problème de localité est soulevé par un théorème bien connu de J. Bell (1) qui se rattache à un raisonnement formulé en 1935 par Einstein, Podolsky et Rosen (2). Ce raisonnement, connu sous la dénomination de "paradoxe EPR", a été construit pour démontrer que le formalisme de la Mécanique Quantique ne fournit pas une description complète des microsystèmes individuels. Les hypothèses qui constituent la base de départ du paradoxe EPR sont indiquées dans le tableau suivant (où des notations abrégées leur sont associées) :

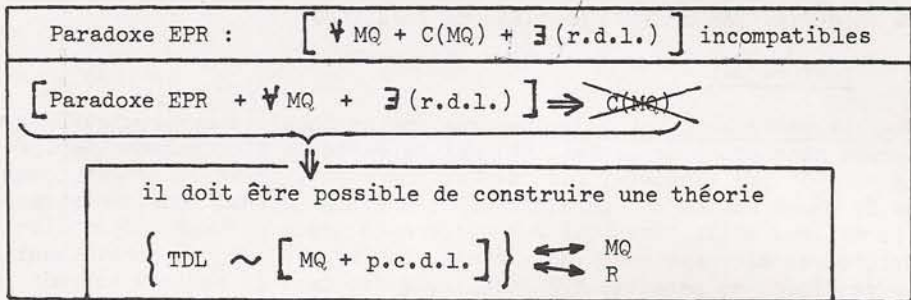
|   |                    |
|---|--------------------|
| Toutes les prévisions de la Mécanique Quantique sont vraies.  | $\forall$ MQ       |
| La Mécanique Quantique fournit une description complète des microsystèmes.                                      | C (MQ)             |
| La réalité physique existe indépendamment de l'observation. Elle est "déterministe" et locale (ou "séparable")* | $\exists$ (r.d.l.) |

\*) La signification attachée par Einstein, Podolsky et Rosen à ces qualificatifs est supposée connue. Je note qu'elle est clairement définie au niveau sémantique pur, mais elle n'est pas formalisée, elle n'est pas transcrite mathématiquement.

Le "paradoxe EPR" consiste dans la démonstration du fait que les hypothèses énumérées ne sont pas compatibles.

L'interprétation proposée par Einstein, Podolsky et Rosen de cette démonstration a été la suivante :

Les prévisions du formalisme quantique se montrent correctes. Il n'existe donc aucune base pour abandonner l'hypothèse  $\forall MQ$ . L'hypothèse  $\exists$  (r.d.l.) exprime un credo métaphysique que l'on est libre d'accepter ou de rejeter. Mais si on l'accepte, alors il faut l'adjoindre aux prévisions de la Mécanique Quantique. En ce cas la démonstration de l'incompatibilité du système d'hypothèses [ $\forall MQ + C(MQ) + \exists$  (r.d.l.)] oblige à abandonner l'hypothèse de complétude  $C(MQ)$ . En d'autres termes, cette démonstration oblige alors à accepter la possibilité d'une théorie déterministe et locale (TDL) des microphénomènes, où le formalisme quantique sera complété par des éléments descriptifs additionnels, des "paramètres cachés" (par rapport au formalisme quantique) déterministes et locaux (p.c.d.l.) qui permettent d'accomplir une description complète des microsystèmes individuels. Cette description complète fournie par TDL doit être compatible avec la Mécanique Quantique - en vertu de l'hypothèse  $\forall MQ$  - et avec la Relativité - en vertu de l'hypothèse  $\exists$  (r.d.l.) qui se trouve intégrée dans la Théorie de la Relativité. Cette structure d'idées peut être représentée par le schéma suivant :

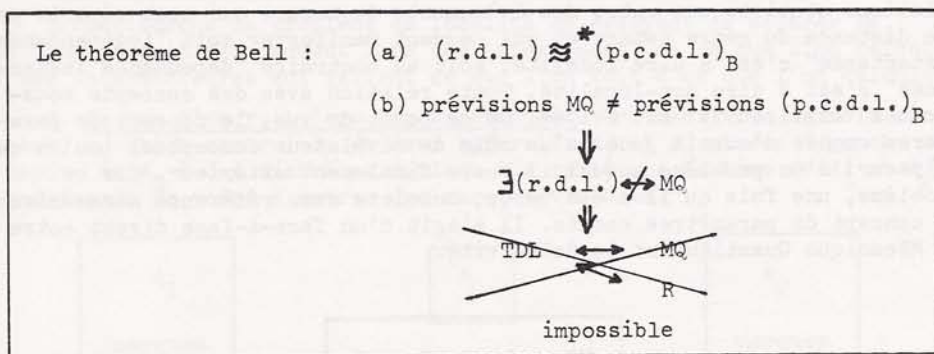


Les réactions pendant 30 ans. Les réactions ont été diverses. Pourtant la note dominante a été nettement celle du positivisme : l'hypothèse "réaliste"  $\exists$  (r.d.l.) est dépourvue de toute signification opérationnelle. Elle est donc essentiellement métaphysique, extérieure à la démarche scientifique. L'incompatibilité dénommée "paradoxe EPR" n'existe que par rapport à cette hypothèse non-scientifique, et donc elle ne constitue pas un problème scientifique. Pour la science il s'agit là d'un faux problème.

Le théorème de J. Bell (1965). Trente années plus tard J. Bell a démontré un théorème qui semble contredire l'interprétation associée par Einstein, Podolsky et Rosen à leur propre démonstration. La conclusion du théorème de Bell peut s'énoncer ainsi (ou de manières équivalentes) : il n'est pas possible, à l'aide de paramètres cachés déterministes et locaux, d'obtenir dans tous les cas les mêmes prévisions que la Mécanique Quantique ; en certains cas, de tels paramètres conduisent à d'autres prévisions. Si alors on veut rétablir l'accord avec les prévisions de la Mécanique Quantique, il faut supprimer le caractère local des paramètres cachés introduits, ce qui contredira l'hypothèse  $\exists$  (r.d.l.), que la Théorie de la Relativité incorpore. Par conséquent la théorie déterministe TDL compati-

ble à la fois avec la Mécanique Quantique et la Relativité, dont Einstein, Podolsky et Rosen ont cru avoir établi la possibilité, est en fait impossible.

La démonstration repose sur la production d'un exemple. On considère deux systèmes  $S_1$  et  $S_2$  à spins non-nuls et corrélés, créés par la désintégration d'un système initial  $S$  de spin nul. On envisage des mesures de spin sur  $S_1$  selon trois directions  $a, b, c$ , à l'aide d'un appareil  $A_1$ , et des mesures de spin sur  $S_2$  selon ces mêmes directions, à l'aide d'un appareil  $A_2$  qui peut se trouver à une distance arbitrairement grande de  $A_1$ . L'hypothèse  $\exists$ (r.d.l.) est ensuite formalisée : des paramètres cachés sont introduits et ils sont soumis à des conditions telles qu'elles fournissent une traduction mathématique des qualifications de "déterministes" et "locaux". Ainsi la conceptualisation introduite auparavant au niveau d'une sémantique claire, mais qualitative, est élevée jusqu'à un niveau sémantique syntaxisé. Un tel pas est souvent important, car il peut permettre des déductions mathématiques à conclusions quantitatives. Et en effet Bell a démontré que l'hypothèse  $\exists$ (r.d.l.) ainsi formalisée entraîne nécessairement une certaine inégalité concernant les corrélations statistiques entre les résultats de mesures de spins enregistrés sur les appareils  $A_1$  et  $A_2$ . Or, cette inégalité n'est pas satisfaite par les corrélations statistiques prévues par la Mécanique Quantique. On pourrait retrouver les corrélations quantiques en supprimant la condition qui traduit mathématiquement le caractère "local" des paramètres cachés introduits, c'est à dire en renonçant à une partie de l'hypothèse  $\exists$ (r.d.l.). On exprime ceci en disant que, dans la circonstance considérée, "la Mécanique Quantique est non-locale" ou "implique des effets non-locaux" qui la rendent incompatible avec  $\exists$ (r.d.l.). Schématiquement, on peut résumer l'apport de Bell ainsi (en notant  $(p.c.d.l.)_B$  les paramètres cachés soumis aux conditions de Bell) :



Comme les statistiques dont il s'agit sont observables, il est en principe possible d'établir expérimentalement si les faits physiques correspondent aux prévisions de la Mécanique Quantique où à celles entraînées par les paramètres cachés déterministes et locaux au sens de Bell. C'est l'un des traits les plus forts du théorème de Bell.

\* Le signe  $\approx$  n'appartient à aucun algorithme. Ici il se lit : "descriptible sur le plan formel par".

Si l'expérience infirmait la Mécanique Quantique, la situation conceptuelle créée paraîtrait claire. On devrait admettre la possibilité d'une théorie déterministe et locale des microphénomènes, mais différente de celle envisagée par Einstein, Podolsky et Rosen, car elle n'obéirait pas à l'exigence d'identité prévisionnelle avec la Mécanique Quantique, pour tous les cas.

Mais un certain nombre d'expériences de vérification a déjà été fait et il se trouve que les résultats obtenus à ce jour - bien qu'ils ne tranchent pas encore définitivement - étayaient fortement la supposition que la prévision de la Mécanique Quantique s'imposera comme correcte.

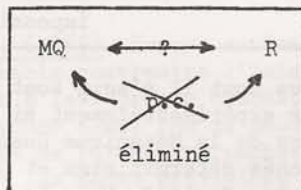
Il s'agit donc de comprendre la situation conceptuelle qui semble s'établir et que l'on dénomme "problème de localité".

### Interprétations

Le problème de localité est ressenti diversement. Je distinguerai en gros trois interprétations, en omettant ou en bousculant beaucoup de nuances.

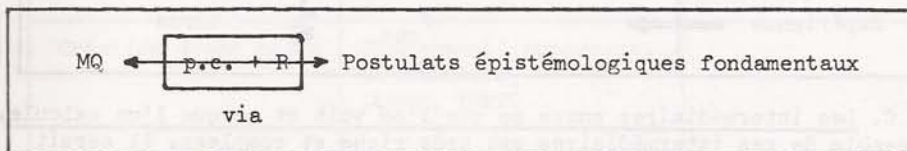
1. L'interprétation de refus. Un certain nombre de physiciens semble considérer cette fois encore qu'il s'agit d'un problème métaphysique qui n'existe que par rapport au concept non opérationnel de paramètres cachés, mais qui se dissout dès qu'on refuse ce concept. D'autres physiciens considèrent que le problème n'existe pas parce qu'il est faussement posé (3).

2. L'interprétation minimale. Selon d'autres physiciens\* (4), (5), (6), (7), etc..., le problème satisfait cette fois aux normes positivistes les plus draconiennes, parce qu'il conduit à des tests expérimentaux. Toutefois, ils refusent de conceptualiser au delà de ce que ces tests mettent en jeu. Ils ne prennent en considération strictement que des corrélations statistiques entre des événements de mesure qui sont séparés par une distance du genre espace et qui peuvent manifester soit "indépendance instantanée" c'est à dire localité, soit au contraire "dépendance instantanée" c'est à dire non-localité. Toute relation avec des concepts sous-jacents "explicatifs" est évitée. De ce point de vue, le concept de paramètres cachés n'aurait joué qu'un rôle de révélateur conceptuel (ou de catalyseur) d'un problème auquel il reste finalement extérieur. Car ce problème, une fois qu'il a été perçu, subsiste sans référence nécessaire au concept de paramètres cachés. Il s'agit d'un face-à-face direct entre la Mécanique Quantique et la Relativité.



\*) Je prie à l'avance de m'excuser ceux qui n'estimeraient pas appartenir à cette catégorie.

3. L'interprétation épistémologique. Il existe enfin une tendance (8) à connecter le problème de localité à notre conceptualisation la plus courante de la réalité, qui postule l'existence d'objets isolés possédant des propriétés intrinsèques et permanentes. La violation des inégalités de Bell serait incompatible avec ces suppositions. Il s'agirait donc en dernière essence d'un face-à-face entre la Mécanique Quantique et - à travers le concept de paramètres cachés et à travers la Relativité - des postulats épistémologiques fondamentaux.



Je n'examinerai pas l'interprétation de refus, car elle ne peut conduire à aucun élément nouveau.

Quant aux deux face-à-face impliqués par les deux autres interprétations, aucun d'eux ne me semble s'imposer dans la phase actuelle du débat. Seule une question ressort clairement :

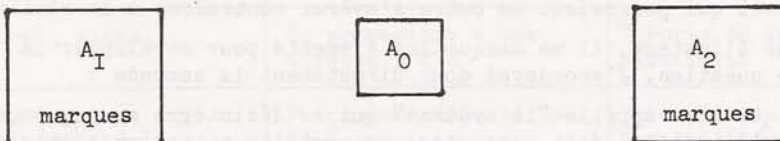
Qu'est-ce qui est en jeu - au juste - dans le problème de localité?

L'examen qui suit montrera que, pour fixer une réponse, les conceptualisations existantes et les tests sur l'inégalité de Bell ne peuvent pas suffire. Inévitablement d'autres conceptualisations encore et les tests correspondants, devront être abordés. Sinon, aucune conclusion définitive ne pourra être tirée, même si l'inégalité de Bell est clairement violée.

Le problème de localité et le terrain conceptuel sous-jacent

Reconsidérons le problème de localité en essayant de séparer ce que l'on perçoit directement lors des expériences, de ce que l'on calcule, et des intermédiaires qui relient ce que l'on voit à ce que l'on calcule.

A. Ce que l'on voit lors des expériences. On voit (tous détails mis à part) un objet central  $A_0$  et deux appareils  $A_1$  et  $A_2$  placés à gauche et à droite de  $A_0$  à des distances égales. Sur certaines parties de  $A_1$  et  $A_2$  apparaissent de temps à autres des marques visibles.



B. Ce que l'on calcule. On calcule des corrélations statistiques en employant trois sortes de distributions de probabilités conduisant à trois fonctions de corrélation, une fonction  $F_{(TDL)_B}$  caractéristique d'une théorie déterministe locale au sens de Bell, une fonction  $F_{MQ}$  obéissant aux algorithmes de la Mécanique Quantique, et une fonction  $F_{obs}$  correspondant aux statistiques observées. L'inégalité de Bell distingue  $F_{(TDL)_B}$  de  $F_{MQ}$ . L'expérience doit montrer si la réalité observée reproduit  $F_{MQ}$  ou  $F_{(TDL)_B}$  :

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| $F^{(TDL)}_B$ , $F_{MQ}$ , $F_{obs}$ |   |
| Inégalité de Bell                    | $\Rightarrow F^{(TDL)}_B \leq \text{borne} , F_{MQ} > \text{borne}$ |
| Expérience                           | $\Rightarrow F_{obs} \stackrel{?}{\geq} \text{borne}$               |

C. Les intermédiaires entre ce que l'on voit et ce que l'on calcule.

L'ensemble de ces intermédiaires est très riche et complexe. Il serait insensé de vouloir donner une énumération et une caractérisation exhaustive. Je vais donc opérer une sorte d'échantillonnage, mais en distinguant entre les mots que l'on emploie, les concepts reliés à ces mots et les organisations syntaxiques dans lesquelles ces concepts se trouvent intégrés.

(Voir tableau page suivante)

La colonne centrale de ce tableau est peut-être quelque peu choquante d'un point de vue positiviste. Mais de toute façon les paramètres cachés déterministes et locaux de Bell violent la pudeur sémantique dictée par le positivisme. Alors autant aller jusqu'au bout et avouer l'ensemble des questions sémantiques liées aux interprétations (2) et (3) du problème de localité telles que je les ai distinguées plus haut.


Je commence par l'interprétation minimale. Je perçois deux questions.

En premier lieu, les contenus sémantiques assignés aux qualificatifs "déterministes" et "locaux", tels qu'ils sont impliqués par la modélisation mathématisée de Bell, permettent-ils la représentation la plus générale concevable d'un processus d'observation d'un "microsystème" à l'aide d'un "appareil" macroscopique?

En second lieu, en supposant que la modélisation de Bell d'un processus d'observation n'introduit vraiment aucune restriction non nécessaire, quelle sorte de non-localité, exactement, la violation de l'inégalité de Bell démontrerait-elle? La non-localité que la Théorie de la Relativité interdit clairement, ou bien des prolongements spontanés et encore flous de celle-ci qui pourraient en outre s'avérer contraires à la réalité?

Pour l'instant, il me manque les éléments pour développer la première question. J'aborderai donc directement la seconde :

Ce que l'on appelle "le système" qui se désintègre en  $A_0$ , pour autant qu'il existe, doit comporter une certaine extension spatiale non nulle de départ  $\Delta x(t_0) \neq 0$  (ce qui peuple ce domaine d'espace, est-ce un "objet" ou un "processus", ou les deux à la fois? Les définitions mêmes manquent pour répondre). Ce que l'on désigne par les termes "désintégration" ou "création d'une paire  $S_1$  et  $S_2$ " comment le concevoir? Les mots indiquent dans le substrat conceptuel l'hypothèse d'un processus, d'une entité réelle en cours de changement. Pour exister, ce processus doit se produire quelque part et il doit durer, il doit occuper un certain domaine non nul d'espace-temps  $\Delta s_c(t) \cdot \Delta t_c \neq 0$  (l'indice c : création) à l'intérieur

| MOTS                      | CONCEPTS   | ORGANISATIONS SYNTAXIQUES  |
|---------------------------|--|--|
| 1 système                 | Macroobjet, objet  | Logique des classes d'objets et des prédicats                                      |
| Création d'une paire      | Changement, processus, SUCCESSIONS, DUREE, TEMPS                                   |  |
| 2 systèmes corrélés       | Objets $\leftrightarrow$ corrélés<br>$\leftrightarrow$ isolés                      |  |
| Appareil                  | Macroobjet capable de réagir d'une manière significative avec un microsystème      |  |
| Spin                      | Propriété d'observation  |  |
| Mesure                    | Processus d'observation<br>Événement de connexion entre microobjets et macroobjets |  |
| Paramètres cachés         | Propriétés intrinsèques et permanentes (d'objets ou de processus)                  |  |
| Déterministe              | Prévisible?<br>A partir de quoi?   |  |
| Local, signal             | Se propageant à une vitesse $v < c$  | Théorie de la Relativité   |
| Statistiques Probabilités | Phénomènes aléatoires (événements, processus, objets)                              | Théorie des Probabilités   |
| Prévisions quantiques     | Vecteurs d'états, algorithmes quantiques   | Mécanique Quantique  |
| Influence à distance      | Changement transporté à vitesse $v < c$  | ?  |



duquel "le système de départ S" existe encore mais change, cependant que  $S_1$  et  $S_2$  n'existent pas encore mais se forment. Dans l'écriture qui désigne ce domaine d'espace-temps, le facteur de durée  $\Delta t_c = t_{I2,0} - t_0$  initial s'étend - par définition - d'une certaine "valeur initiale de temps"  $t_0$  où le changement de création commence, jusqu'à une "valeur finale de temps"  $t_{I2,0}$  à partir de laquelle la "paire  $S_1, S_2$  corrélés" commence à exister (des objets? des processus eux aussi? les deux à la fois?). Quant au facteur d'extension spatiale  $\Delta s(t)$  il semble obligatoire de concevoir, puisqu'il s'agit d'un processus, qu'il change en fonction de la "valeur de temps" ( $t_0 \leq t \leq t_{I2,0}$ ) en restant toutefois métastablement connexe tant que  $t < t_{I2,0}$ , c'est à dire tant que S subsiste encore et que  $S_1$  et  $S_2$  ne sont pas encore créés. Pour tout  $t > t_{I2,0}$  toutefois ce domaine spatial devrait être devenu non connexe via une scission plus ou moins "catastrophique" conduisant à cette nouvelle forme de stabilité à laquelle on rattache les termes "paire  $S_1, S_2$  corrélés".

Je m'arrête un instant et je regarde ce que je viens d'écrire. Quel mélange de "nécessités" et d'arbitraires, de signes et de mots qui ont l'air de pointer vers un designatum précisé et sous lesquels pourtant on ne trouve que des images floues et mouvantes accrochées à ces mots et ces signes de manière non séparée. J'écris entre guillemets "valeur de temps" par exemple, parce qu'à chaque fois que je réfléchis au degré d'exploration où se trouvent encore les concepts de durée et de temps et leur relation, je ressens une réticence à écrire quoi que ce soit à l'extérieur d'un algorithme qui fixe une règle du jeu. La paramétrisation de la propriété fondamentale de durée à l'aide de la variable de temps  $t$ , telle que cette paramétrisation est pratiquée dans les théories existantes - et même dans la Relativité - est encore certainement très simplificatrice et souvent falsificatrice, rigidifiante, mécanisante en quelque sorte. Les changements ne sont pas toujours des déplacements d'entités stables intérieurement. Pour pouvoir rendre compte pleinement de l'entière diversité des types et des intensités de changements, il faudrait une sorte de grandeur vectorielle, un champ de temps processuel défini en chaque point de l'espace abstrait encadré par l'axe de durée et par les axes des changements envisagés. Mais un tel temps se transformerait-il selon Lorentz? Quel rôle joue la vitesse d'un "signal" lumineux face aux vitesses de propagation d'"influences" (?) dans un tel espace processuel? Qu'est-ce que la Relativité impose véritablement au processus quelconque, et qu'est-ce qu'elle laisse en blanc? Lorsqu'il s'agit de processus (relativement) très "intenses" localement, "catastrophiques", comme l'est probablement la "création d'une paire", que devient "le temps"? En théorie relativiste générale de la gravitation par exemple, un gradient non nul du champ de gravitation est lié à une non-définissabilité d'un temps unique pour les observateurs d'un même référentiel, si ces observateurs sont spatialement distants l'un de l'autre. Quant à l'invariance de la vitesse de la lumière elle-même (et non la vitesse d'autres sortes d'"influences") lorsqu'on passe d'un référentiel à un autre, elle n'est postulée que localement car il n'existe aucune définition univoque des distances et des temps dans des champs gravitationnels variables (9) (espace-temps courbe). Comment savoir quelle sorte de "courbure" locale de l'espace-temps produit (ou non) un processus -essentiellement variable - de création d'une paire? Enfin, la Relativité n'introduit aucune quantification, sa description est continue. Lorsqu'on écrit vitesse = distance / temps, le temps est un paramètre continu.

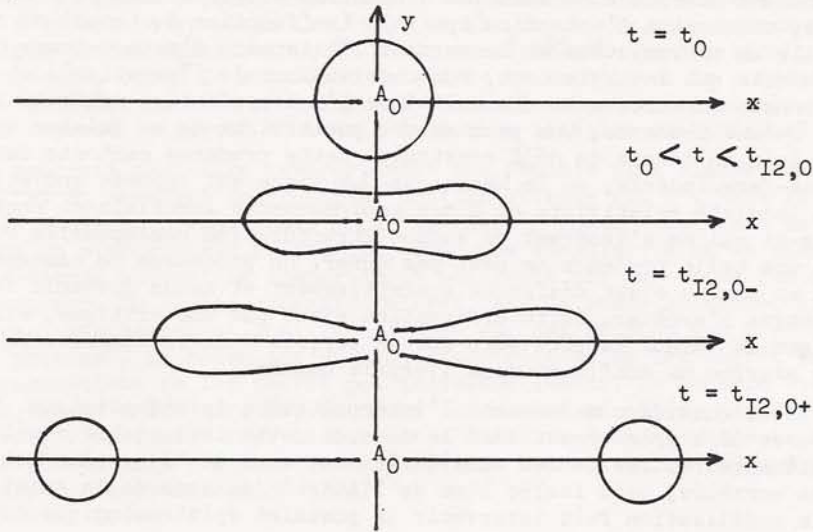
Si ensuite on se demande comment on trouve la valeur de  $t$ , on s'aperçoit qu'elle est de la forme  $NT_H$ , où  $N$  est un entier et  $T_H$  une période d'"horloge" (supposée constante!), ce qui ramène au discret. En macroscopie ou en cosmologie cela peut être négligeable aussi bien sur le plan du principe que sur le plan numérique. Mais lorsqu'on considère des processus microscopiques qui, comme la création d'une paire, sont essentiellement quantiques et relativement très brefs, quel est le degré de signifiante d'une condition comme

$$v = \frac{\text{distance}}{\text{temps}} = \frac{\text{distance}}{NT_H} = \text{const?}$$

Quelle horloge faut-il choisir, avec quel  $T_H$ , et comment par ailleurs s'assurer que lorsqu'on écrit  $\Delta t = 10^{-x}$ , on fait plus qu'un calcul vide de sens?

On comprend, devant de telles questions, les prudences positivistes et les normes qui conseillent de se maintenir dans la zone salubre de l'opérationnellement défini et du syntaxisé, où la pensée circule sur des voies tracées et consolidées. Au dehors, on s'enfonce dans une véritable boue sémantique. Pourtant ce n'est que là, dans cette boue, et lorsqu'on force le regard à discerner les formes mouvantes, que l'on peut percevoir les contacts entre le non-fait et le partiellement fait et amorcer ainsi du nouveau. De toute façon le problème de localité nous y force : C'est un problème très fondamental où tout comportement inertiel, inanalysé ou approximatif conduit inéluctablement à l'arrêt de la capacité de raisonnement, ou à des problèmes et perspectives illusoirs. On ne peut pas cette fois suivre un chemin parce qu'il est construit. On est obligé de choisir et de suivre la direction qui convient.

Je reviens donc sur la création d'une paire corrélée  $S_1, S_2$ . J'imagine ce processus comme ayant des analogies avec la formation de gouttes. (Ceci peut être faux, mais ce n'est pas a priori impossible, et je n'ai besoin que d'un exemple de possibilité). Je dessine donc ainsi la projection spatiale (en deux dimensions) du domaine d'espace-temps  $\Delta s_c(t), \Delta t_c$ ,  $t_0 \leq t \leq t_{I2,0}$  (pour 4 époques :  $t = t_0, t_0 < t < t_{I2,0}, t = t_{I2,0-}$  et  $t_{I2,0+}$ ) ; c'est-à-dire immédiatement avant et immédiatement après  $t_{I2,0}$



Supposons maintenant la distance  $d_{I_2}$  entre les appareils  $A_1$  et  $A_2$  plus petite que la projection maximale de  $I_2 \Delta_s(t)$  sur l'axe  $x$  (correspondant à  $t = t_{I_2,0}$ ).

Les appareils  $A_1$  et  $A_2$  seront donc atteints non pas par " $S_1$  et  $S_2$ " respectivement, mais par " $S_2$  en cours de désintégration", qui peut néanmoins déclencher des enregistrements sur  $A_1$  et  $A_2$ . Supposons encore que la durée des événements de mesure se trouve être telle, par rapport à  $d_{I_2}$ , que la distance d'espace-temps entre les événements de mesure soit du genre espace. Enfin, supposons qu'en dépit de tout cela, les événements de mesure ne soient pas indépendants au sens de Bell, c'est-à-dire supposons qu'un changement de  $A_2$  puisse agir à une vitesse  $v > c$  sur le résultat de l'un des enregistrements de  $A_1$ . Les statistiques de résultats d'enregistrements sur  $A_1$  et  $A_2$  seront alors "non-localement corrélés" et l'inégalité de Bell sera violée. Mais serait-il en ce cas justifié de conclure qu'on a démontré une contradiction avec la Théorie de la Relativité? La Relativité ne statue que sur des "signaux" (quelle est exactement la définition?) se propageant "dans le vide". Elle ne statue rien du tout concernant la transmission d'"influences" (définition?) à travers "un système" (Objet? Processus?). En particulier, elle n'impose rien concernant "l'ordre temporel" (?) ("causal" ou "non-causal") (?) d'événements placés à des endroits spatiaux différents d'"un même système". L'exemple imaginé n'appartient simplement pas au domaine de faits que la Relativité décrit. Aucune théorie constituée ne le décrit encore. Pourtant cet exemple, quelles que soient ses inadéquations face à la réalité inconnue, caractérise certainement d'une manière en essence correcte ce qui mérite la dénomination de processus de création d'une paire : un tel processus doit occuper un domaine non nul d'espace-temps, dont la projection spatiale connexe évolue, devenant non connexe.

Cet exemple de possibilité me semble suffire comme base pour la conclusion suivante : Les tests destinés à vérifier l'inégalité de Bell, même s'ils violaient définitivement l'inégalité, ne pourront jamais établir à eux seuls que le principe relativiste de localité a été enfreint. Pour préciser ce qui est en jeu, la modélisation de Bell et le test correspondant devront être associés à d'autres modélisations et à d'autres tests, concernant l'extension spatiale (en fonction du temps) de ce qu'on appelle un microsystème et concernant l'extension d'espace-temps des événements qui interviennent, non-observationnels ("création") et observationnels (mesures). La minimalité de l'interprétation minimale n'est en fait qu'une prudence, une peur encore positiviste de se laisser entraîner trop loin en dehors du déjà construit. Cette prudence cantonne dans un face-à-face indécis, où la Mécanique Quantique est opposée indistinctement à la localité relativiste et à des prolongements inertiels et confus de celle-ci qui ne s'insèrent en aucune structuration conceptuelle constituée. Mais une telle prudence ne peut pas durer. Un processus de conceptualisation en chaîne s'est déclenché subrepticement et aucun obstacle factice ne pourra l'arrêter. Cette affirmation n'est pas une critique, elle désigne la valeur la plus sûre que je perçois dans la démarche de Bell, et elle exprime ma confiance dans l'esprit humain.

Je considère maintenant l'interprétation épistémologique. Celle-ci s'avance déjà précisément dans le sens de cette inéluctable modélisation supplémentaire. Les termes considérés sont ceux de "1 système" et "2 systèmes corrélés, mais isolés l'un de l'autre" (au sens de la Relativité). Cette modélisation fait intervenir le postulat épistémologique courant

d'existence de propriétés intrinsèques pour des entités réelles isolées. On déduit de ce postulat des inégalités du même type que celles de Bell, concernant des statistiques de résultats de mesures sur les entités supposées isolées. On établit donc une connexion entre des tests sur des inégalités observables d'une part, et d'autre part le postulat épistémologique d'existence de propriétés intrinsèques pour des objets isolés au sens de la Relativité. Sur cette base, on admet (il me semble?) que la violation de l'inégalité de Bell infirmerait à elle seule la signifiante de la conceptualisation en termes d'entités isolées possédant des propriétés intrinsèques. Or j'ai montré ailleurs (IO) (en termes trop techniques pour être reproduits ici) que cela n'est pas possible. Ici je ne ferai à ce sujet que quelques remarques qualitatives.

Tout d'abord, les considérations faites plus haut concernant la création d'une paire peuvent aussi se transposer d'une manière évidente au cas de l'interprétation épistémologique. Mais prolongeons encore autrement ces considérations : plaçons-nous cette fois d'emblée à l'instant  $t = t_{I2,0}$  où  $S_1$  et  $S_2$  sont créés. Pour  $t > t_{I2,0}$ ,  $S_1$  et  $S_2$  occupent maintenant deux domaines d'espace disjoints  $\Delta s_1(t)$  et  $\Delta s_2(t)$  qui s'éloignent l'un de l'autre et qui rencontrent ensuite respectivement les appareils  $A_1$  et  $A_2$ , produisant des interactions de mesure. L'interaction de mesure de  $S_1$  avec  $A_1$  est un événement qui occupe un domaine non nul d'espace-temps  $\Delta s_1(t_{m1}) \cdot \Delta t_1(\Delta s_1(t_{m1})) \neq 0$  où le facteur de durée  $\Delta t_1(\Delta s_1(t_{m1}))$  dépend de l'extension spatiale  $\Delta s_1(t_{m1})$  à l'époque  $t_{m1} \in \Delta t_1$  (en supposant  $\Delta s_1$  constant pendant  $\Delta t_1$ ). Il en va de même pour l'événement de mesure sur  $A_2$ , dont l'extension d'espace-temps est  $\Delta s_2(t_{m2}) \cdot \Delta t_2(\Delta s_2(t_{m2})) \neq 0$ . Comment définir maintenant la distance d'espace-temps entre ces deux événements de mesure? Quelle que soit la distance spatiale fixée entre  $A_1$  et  $A_2$ , comment savoir si la distance correspondante d'espace-temps entre les événements de mesure est ou non du genre espace? Car c'est cela qui décide si oui ou non la condition cruciale d'"isolation" réciproque de ces événements se réalise, et c'est sur la base de cette condition que l'on s'attend à l'inégalité de Bell pour les statistiques des résultats enregistrés. Que la distance d'espace-temps entre les événements de mesure soit ou non du genre espace, cela dépend évidemment (entre autres) des facteurs d'extension spatiale  $\Delta s_1(t_{m1})$  et  $\Delta s_2(t_{m2})$ . Or, que savons-nous de la valeur de ces facteurs?  $S_1$  et  $S_2$  se déplacent-ils "en bloc", "mécaniquement", comme le suggèrent le modèle de Broglie et le concept récent de soliton, ou bien s'étalent-ils comme le suggère le concept quantique courant de paquet d'ondes à évolution linéaire Schrödinger?

On pourrait peut-être espérer avoir une réponse plus claire dans le cas où  $S_1$  et  $S_2$  seraient des photons "dont la vitesse est c". Mais la vitesse de quoi? Du "front" oui, mais "le reste"? Comment est fait un photon, comme un micro-système de Broglie, avec une singularité et un phénomène plus étendu autour? Le comportement manifesté par des ondes radio le laisse supposer. De quelle extension alors? Dans la phase actuelle, que savons nous, exactement et individuellement sur ces entités que l'on dénomme "photons"? La Mécanique Quantique newtonienne ne les décrit pas. L'électromagnétisme ne les décrit pas individuellement. La Théorie Quantique des Champs a été marquée, au cours des années récentes, par des essais "semi-classiques" dont le but est d'éliminer tout simplement la notion de photon afin d'éviter les difficultés conceptuelles liées aux algorithmes de renormalisation (II).

On peut donc conclure en toute généralité que quelle que soit la distance spatiale fixée entre  $A_1$  et  $A_2$  (qu'il s'agisse de micro-systèmes à masse non nulle au repos ou de photons) pour savoir si les événements de mesure sur ces systèmes sont séparés ou non par une distance d'espace-temps du genre espace, il faudrait connaître (entre autres) l'extension spatiale de ces micro-systèmes en fonction du temps.

Sans détailler plus des enchaînements logiques non essentiels, ces seules remarques suffisent pour indiquer la base de l'affirmation suivante :

A eux seuls, les tests de l'inégalité de Bell ne permettront jamais de conclure concernant la signification de l'assignation de propriétés intrinsèques à des entités réelles isolées au sens de la Relativité. Donc pour l'instant aucun face-à-face n'est encore défini entre la Mécanique Quantique et les postulats épistémologiques de notre conceptualisation courante de la réalité. Seule une direction de pensée est tracée, qui suggère l'intérêt de recherches nouvelles sur la structure d'espace-temps de ce que l'on appelle des micro-systèmes individuels. Cette direction de pensée me paraît courageuse et très importante - dans la mesure où elle se reconnaît et s'assume. Elle s'associe alors naturellement à des recherches récentes sur l'extension des micro-systèmes à masse non nulle au repos (I2), (I3) et sur le concept de photon (II). Il est très remarquable de voir que toutes ces recherches se concentrent sur les phénomènes et les concepts d'interférence. En effet c'est là qu'à travers la statistique peut apparaître l'individuel. C'est là que peut se trahir - si on l'y cherche - la confusion entre des interférences mathématiques de statistiques standards et des statistiques d'interférences physiques d'une entité individuelle, qui se superpose avec elle-même (I4), (I5).

A travers le problème de localité, j'ai dirigé volontairement les regards sur la couche sémantique qui se trouve sous les mots qu'on emploie. L'état de celle-ci est en quelque sorte l'objet principal de ces remarques. La boue sémantique au dessus de laquelle nous voltigeons salubrement d'algorithme en algorithme, accrochés à des cordes de mots, me paraît mériter d'être connue de plus près. Il faudra bien y plonger pour forger les concepts nouveaux qui manquent et en fixer les contours d'une manière qui permette de s'élever jusqu'à des syntaxisations.

Je voudrais maintenant clore l'enquête en considérant brièvement les organisations syntaxiques dont nous disposons, leur degré d'unification, et les domaines conceptuels qu'elles recouvrent. Je constituerai ainsi la base de ma conclusion globale sur le problème de localité.

Le concept d'objet au sens macroscopique de ce terme est cerné avec rigueur - bien que qualitativement - à l'intérieur de la logique des classes d'objets et des prédicats. Celle-ci est par essence une théorie des objets macroscopiques explicitement structurée et de généralité maximale. Mais cette théorie est foncièrement inapte à une description non restreinte des changements. En effet, la logique des classes d'objets et des prédicats est fondée sur la relation d'appartenance  $\in$  : Si pour l'objet  $x$  le prédicat  $f$  est vrai alors  $x$  appartient à la classe  $C_f$  définie par  $f$  :  $f(x) \Rightarrow x \in C_f$ . Mais cette relation fondamentale d'appartenance  $\in$  est conçue au départ d'une manière statique, hypostasiée. Aucun aménagement ultérieur ne peut compenser les rigidités introduites ainsi au départ. La théorie des probabilités d'une part et d'autre part les différentes théories physiques (la Mécanique, la Thermodynamique, les Théories des Champs,

la Mécanique Quantique, la Relativité) sont arrivées à combler cette lacune à des degrés différents. Mais chacune pour une catégorie particulière de faits et par des méthodes implicites et diversifiées. Une théorie générale et spécifique des événements et des processus, une logique des changements absolument quelconques, à méthodologie explicite et unifiée, n'a pas encore été construite\*.

Considérons maintenant de nouveau la logique des classes d'objets et des prédicats. Elle transgresse foncièrement l'individuel, puisqu'elle décrit des classes. Elle semblerait donc être vouée naturellement à une quantification numérique de type statistique ou probabiliste, à l'aide d'une mesure de probabilité définie sur les classes. Pourtant, à ce jour, une telle quantification numérique de la logique n'a pas pu être accomplie. Les "quantificateurs" logiques  $\exists, \forall, \emptyset$  sont restés qualitatifs.

Complémentairement en quelque sorte, à ce jour, la Théorie des Probabilités n'a pas encore développé explicitement un traitement classificateur. Le concept fondamental employé est celui d'espace de probabilité  $(U, \mathcal{C}, p(\mathcal{C}))$  où  $p(\mathcal{C})$  désigne une mesure de probabilité posée sur une tribu  $\mathcal{C}$  d'événements, définie sur l'Univers  $U = \{\mathcal{E}_i\}$  d'événements élémentaires  $\mathcal{E}_i$ . Cette tribu peut refléter, en particulier, une classification des événements élémentaires  $\mathcal{E}_i$  commandée par un prédicat  $f$  et en ce cas des propriétés spécifiques "logiques" s'ensuivent pour l'espace  $(U, \mathcal{C}, p(\mathcal{C}))$ . Via ces propriétés classificatrices, la connexion entre logique et probabilités pourrait être amorcée. Mais ceci n'a pas été tenté, et la connexion reste pour l'instant non élaborée.

Considérons maintenant la Mécanique Quantique. Elle introduit des espaces de probabilité. Pourtant les relations entre ces espaces sont telles que certains mathématiciens affirment que "la Mécanique Quantique n'est pas une théorie de probabilités". La connexion entre la Théorie des Probabilités et la Mécanique Quantique reste pour l'instant elle aussi très obscure.

D'autre part les relations de la Mécanique Quantique avec les divers concepts suggérés par le langage qu'elle introduit - I système, I système de 2 systèmes, etc. - restent elles aussi très obscures. La Mécanique Quantique n'indique en fait strictement rien concernant ces concepts tels que l'on pourrait vouloir les imaginer en dehors de l'observation. Même la probabilité de présence n'est qu'une probabilité de résultats d'interactions d'observation : il est permis par la Mécanique Quantique d'imaginer qu'un "système" qui fait une marque sur un écran à un moment  $t$ , se trouvait, en lui-même, aussi loin que l'on veut de cette marque, aussi peu avant  $t$  que l'on veut. La Mécanique Quantique laisse parfaitement non conceptualisée en elle-même, la "réalité" dont elle codifie de manière si riche et détaillée les manifestations observables à travers les interactions de mesure.

Considérons enfin la théorie de la Relativité. Cette théorie est, à sa base, individuelle, non statistique, et continue, non quantifiée.

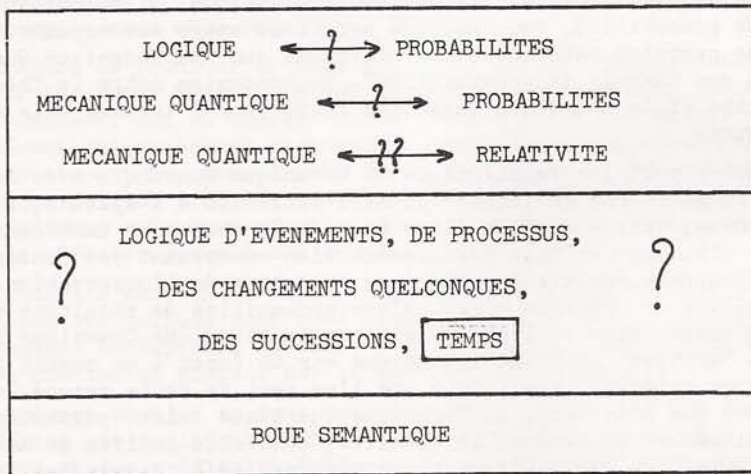
---

\*) J'ai pu prendre connaissance d'une tentative originale et courageuse de formaliser la durée (I6). Jusqu'ici seules les valeurs associables à la durée ("le temps") ont fait objet de certaines formalisations.

En outre, elle décrit "ce qui est", bien que relativement à l'état d'observation. Sa connexion avec les espaces de probabilités à événements observationnels et quantifiés de la Mécanique Quantique soulève des problèmes bien connus et très résistants.

Ainsi nous sommes actuellement en possession de plusieurs structurations syntaxiques constituées, chacune très complexe, riche et rigoureuse. Mais ces structurations sont comparables à des icebergs émergeant de la mer de boue sémantique, sous le niveau de laquelle les bords et les bases disparaissent. Quant à l'ensemble des concepts liés à la propriété fondamentale de durée, les concepts de processus, d'événement, de changement, de permanence, de succession, de TEMPS, ils n'agissent librement qu'à l'état épars, primitif et subjectif, tels que l'expérience et le langage les a diversement induits dans les esprits. Car les organisations auxquelles ces concepts ont été soumis à l'intérieur de la théorie de la Relativité, de la Théorie des Probabilités, ou à l'intérieur de telle ou telle autre théorie physique, sont toutes particularisantes et amputantes. La situation est encore telle que la décrivait Bergson : ... "la déduction est une opération réglée sur les démarches de la matière, calquée sur les articulations mobiles de la matière, implicitement donnée, enfin, avec l'espace qui sous-tend la matière. Tant qu'elle roule dans l'espace ou dans le temps spatialisé, elle n'a qu'à se laisser aller. C'est la durée qui met des bâtons dans les roues" (17).

Je résume une fois encore par un schéma :

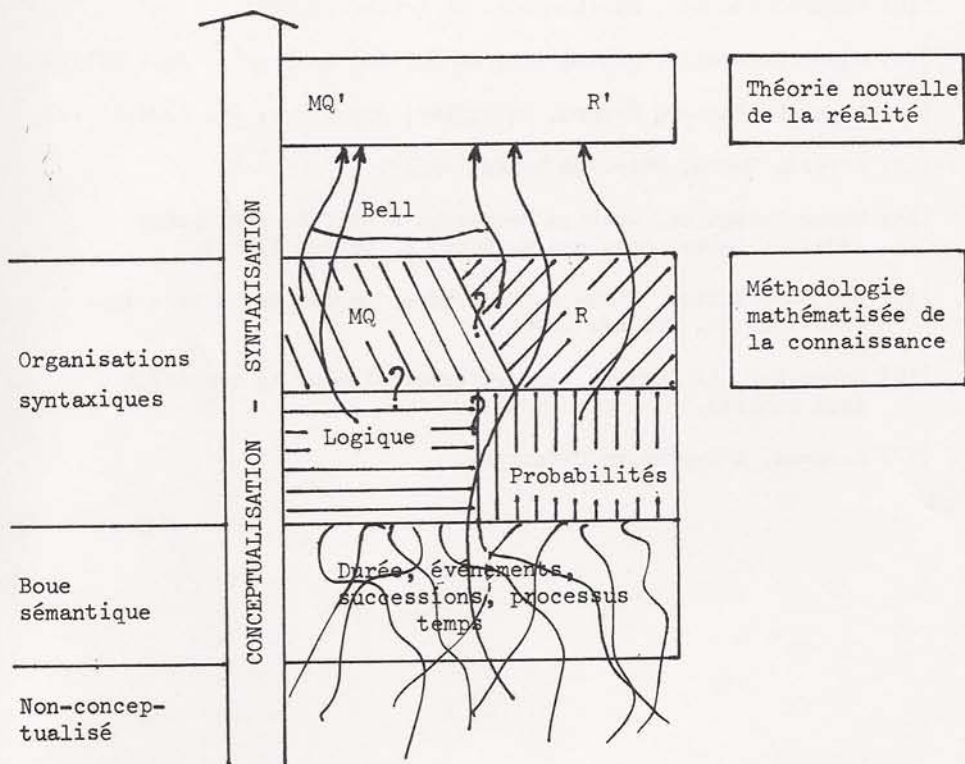


Quand il n'existe encore aucune unification entre la démarche statistique, discrète, observationnelle, orientée vers le microscopique, de la Mécanique Quantique, et d'autre part la démarche individuelle, continue, réaliste, orientée vers le cosmologique, de la Relativité, quand tout ce qui touche à la durée et au temps est encore si peu élucidé, quand tout ce qui touche à la manière d'être de ces entités que l'on appelle des microsystèmes, est encore tellement inexploré, quel sens cela peut-il bien avoir d'affirmer qu'on se trouve - sur la seule base de tests de "non-localité" - devant un face-à-face contraignant, direct ou pas, entre

la Mécanique Quantique et la Relativité? Ou entre la Mécanique Quantique et notre conceptualisation du réel?

Conclusion

Je ne puis qu'écarter, pour ma part, les face-à-face que les autres physiciens pensent percevoir. Pour moi la valeur du théorème de Bell réside ailleurs : ce théorème, et l'écho qu'il soulève, illustrent d'une manière frappante la puissance d'action des modélisations mathématisées, lorsqu'elles sont connectables aux tests expérimentaux. Pendant des dizaines d'années, les tabous positivistes ont fait obstacle aux modèles. Le résultat est ce vide vertigineux de modèles syntaxisés et même seulement qualitatifs que l'on découvre maintenant sous les algorithmes quantiques. Or, la modélisation de Bell, quel que soit l'avenir du problème de localité, a déclenché une dynamique de conceptualisation et de syntaxisation. Cette dynamique atteindra peut-être l'attitude positiviste. Elle ébranlera peut-être la Mécanique Quantique et la Relativité. Car elle attire et maintient longuement l'attention sur l'état du milieu conceptuel dans lequel les théories actuelles sont immergées. De ce contact prolongé sortiront peut-être des théorisations nouvelles, plus unifiées, plus étendues et plus profondes. Je perçois (ici comme en Théorie de l'Information) les premiers mouvements de formalisation de l'épistémologie, les premières ébauches peut-être d'une méthodologie mathématisée de la connaissance. Et cela pourrait s'avérer plus fertile que toute théorie particulière d'un domaine donné de réalité.





## REFERENCES

- (1) Bell, *Physics*, I (1964), 195.
- (2) Einstein, Podolsky, Rosen, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).
- (3) Lochak, *Found. Phys.* 6, 173 (1976).
- (4) Costa de Beauregard, *Found. Phys.* 6, 539 (1976),  
*Phys. Lett.* 67.A, 171.
- (5) Selleri, *Found. Phys.* 8, 103 (1978).
- (6) Stapp, *Phys. Rev.* D13, 947 (1976).
- (7) Vigier, *Nuovo Cimento Lett.* 24, 258 (1979).
- (8) d'Espagnat, *Phys. Rev.* D11, 1454 (1975) et D18, 349 (1978).
- (9) Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, J. Wiley Sons, N.Y. (1975).
- (10) Mugur-Schächter, *Epistemological Letters* (1976).
- (11) Cohen Tannoudji, Exposé fait au Collège de France, Juin 1979.
- (12) Mugur-Schächter, Evrard, Thieffine, *Phys. Rev.* D6, 3397 (1972).
- (13) Evrard, Thèse, Univ. de Reims (1977).
- (14) Mugur-Schächter, *Quantum Mechanics a Half Century Later*  
(Eds. J. Leite Lopes and M. Paty) D. Reidel (1977).
- (15) Mugur-Schächter, *Etude du Caractère Complet de la Mécanique  
Quantique*, G. Villars (1964).
- (16) Schneider, *La Logique self-référentielle de la temporalité*  
(non publié).
- (17) Bergson, *L'Evolution Créatrice*.