

La dynamique par elle-même, Everett et les mondes multiples

Christian Wüthrich

<http://www.wuthrich.net/>

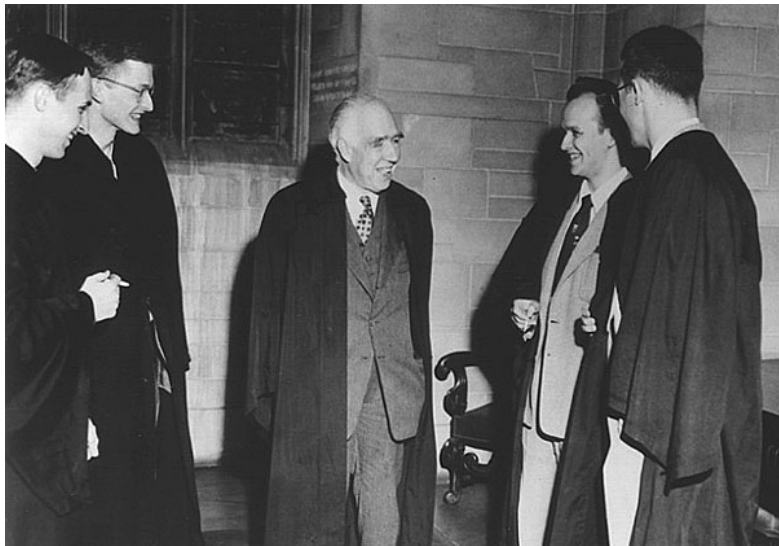
BA7 Introduction à la philosophie de la physique: mécanique quantique

Remerciements pour la traduction et des commentaires: Augustin Baas

Hugh Everett III (1930-1982)



- entra à Princeton pour des études supérieures en 1953
- Une nuit en 1954, «après une ou deux coupes de sherry», il eut une conversation avec co-doctorant Charles Misner et avec Aage Petersen (pendant longtemps l'assistant de Bohr) durant laquelle il eut l'idée de base sur laquelle repose la **théorie des mondes multiples**.
- commença à travailler ces idées dans une thèse sous la supervision de J.A. Wheeler
- Printemps 1956: Wheeler emporte une ébauche de ce travail à Copenhague pour la discuter avec le maître, Pedersen, et Alexander Stern



Princeton, 1955: Everett (deuxième en partant de la droite) avec Niels Bohr et Charles Misner (premier en partant de la gauche).

Les péripéties de la thèse d'Everett

- Après ces discussions, Wheeler écrivit à Everett: “Your beautiful wave function formalism of course remains unshaken; but all of us feel that the real issue is the words that are to be attached to the quantities of the formalism.”
- Voici un avant-goût de ces «mots»: “From the viewpoint of the theory, all elements of a superposition (all ‘branches’) are ‘actual,’ none any more ‘real’ than the rest.” (dans une note de l'ébauche de la thèse)
- Dans une lettre à Stern, Wheeler justifiait la théorie d'Everett comme une **extension**, pas une **réfutation** de la perspective de Copenhague...

Wheeler à Stern

*"I think I may say that this very fine and able and independently thinking young man had gradually come to accept the present approach to the measurement problem as correct and self-consistent, despite a few traces that remain in the present thesis of a past dubious attitude. So, to avoid any possible misunderstanding, let me say that Everett's thesis is not meant to **question** the present approach, but to accept it and **generalize** it."*

Des mondes multiples à la destruction mutuellement assurée

- Évidemment Everett aurait été complètement en désaccord.
- En 1957, Wheeler fit effacer à Everett tous les passages non-orthodoxes de son travail, réduire des trois quarts la longueur originale, et soumettre la nouvelle version.
- En Avril 1957, le jury accepta la version abrégée.
- Découragé, il quitta le monde académique pour travailler en tant que mathématicien dans l'armée et l'industrie.
- En 1959-60, il a aidé à la rédaction d'un rapport classifié «WSEG No. 50» qui a renversé la stratégie militaire nucléaire en vigueur en établissant le résultat d'un conflit nucléaire avec l'Union soviétique comme **destruction mutuellement assurée**.

La formulation originale de l'état relatif

- Everett: que se passerait-il si l'évolution dynamique d'un système quantique est toujours en accord avec l'équation de Schrödinger?
- ⇒ pas d'effondrement, résout le problème de la mesure en rejetant la condition de résultats de mesures définis
- ⇒ repose pas sur la distinction problématique entre monde microscopique et monde macroscopique ou entre objet et observateur ou entre objets conscients et non conscients
- Au lieu de cela: **fonction d'onde universelle**, l'observateur fait partie du système total
- ⇒ Problème de Everett: comment expliquer le système total (particule-appareil-observateur) étant avant la mesure dans un état de superposition quantique de résultats mutuellement incompatibles est en accord avec les prédictions empiriques de la MQ standard?

- Dans ce but, Everett présenta un principe...

Principe (Relativité fondamentale des états mécaniques quantiques)

Dans un état de superposition avant la mesure, l'observateur enregistre «x-spin haut» relatif à la particule dans l'état x-spin haut et «x-spin bas» relatif à la particule dans l'état x-spin bas.

- Mais ce principe ne fournit pas à lui seul les enregistrements de mesures déterminés prédits par la MQ standard.
- ⇒ écart entre ce que Everett expose et ce qu'il a proposé: "He set out to explain why observers get precisely the same sort of measurement records in his no-collapse formulation of quantum mechanics as predicted by the standard collapse formulation of quantum mechanics, but ends up describing a post-measurement observer who apparently does not have **any particular** measurement record." (Barrett 2014, SEP article on Everett)

Trois problèmes avec la théorie originale de l'état relatif



Barrett, Jeff (2014). Everett's relative-state formulation of quantum mechanics. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-everett/>.

Selon Barrett (2014), la théorie originale d'Everett de l'état relatif souffre de trois problèmes fondamentaux:

- 1 Elle n'offre aucune explication du sens dans lequel l'observateur a, ou semble avoir, un enregistrement de mesure déterminé.
- 2 Elle ne tient pas compte des prédictions probabilistes standards de la MQ standard.
- 3 Elle n'est pas **empiriquement cohérente**, c'est-à-dire qu'elle n'explique pas quelle justification empirique on a à l'utiliser si le monde serait en fait décrit fidèlement par elle.

Divers développements de la théorie originale d'Everett tentent de répondre à ces trois défis, bien que dans des contextes différents.

La dynamique par elle-même



Albert, Ch. 6.

Le problème avec une dynamique purement linéaire était que l'état total de post-mesure de couleur de l'observatrice o et de l'appareil de mesure m et de l' e^- mesuré (précédemment dur) est

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\langle\langle\text{noir}\rangle\rangle_o \langle\langle\text{noir}\rangle\rangle_m |\text{noir}\rangle_e + |\langle\langle\text{blanc}\rangle\rangle_o \langle\langle\text{blanc}\rangle\rangle_m |\text{blanc}\rangle_e), \quad (1)$$

c'est-à-dire qu'il n'y a aucun fait sur la couleur de l' e^- ou sur la couleur indiquée par l'appareil de mesure ou sur ce que l'observatrice pense être la couleur de l' e^- .

Everett a affirmé que l'état de post-mesure d'un e^- initialement dur est, en fait, juste la superposition comme celle de (??) ...

Problèmes: probabilités, classicalité/dépendance de la base

- 1 Comment obtenons-nous les bonnes probabilités?
- 2 Albert: “The trouble is that what worlds there are... will depend on **what separate terms there are in the universal state vector** at that instant; and what separate terms there are in that state vector at that particular instant will depend on what **basis** we choose to **write that vector down in.**” (113)
 - Mais il n'y a aucune base préférée qui ferait cela pour nous — du moins pas selon la façon standard de penser...

- Supposez que l'on a l'état de post-mesure dans (??).
- ⇒ Il semble que c'est comme s'il y a avait un monde dans lequel l' e^- est **noir** et un autre monde dans lequel il est **blanc**.
- Mais remarquez que (??) peut être exprimé dans une base différente:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|Q^+\rangle_{(o\&m)}|\text{dur}\rangle_e + |Q^-\rangle_{(o\&m)}|\text{mou}\rangle_e),$$

où

$$|Q^+\rangle_{(o\&m)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\llcorner\text{noir}\lrcorner\rangle_o|\llcorner\text{noir}\lrcorner\rangle_m + |\llcorner\text{blanc}\lrcorner\rangle_o|\llcorner\text{blanc}\lrcorner\rangle_m),$$

$$|Q^-\rangle_{(o\&m)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\llcorner\text{noir}\lrcorner\rangle_o|\llcorner\text{noir}\lrcorner\rangle_m - |\llcorner\text{blanc}\lrcorner\rangle_o|\llcorner\text{blanc}\lrcorner\rangle_m).$$

- ⇒ Mais dans cette base il semble que c'est comme si il y a une monde dans lequel l' e^- est **dur** et un autre dans lequel il est **mou**...

La dynamique par elle-même: la théorie stricte

- **Question:** que serait-ce d'être dans un état tel que (??)?
- Considérons ce qu'une observatrice dans l'état (??) répondrait à la question.
- Ce n'est pas malin de demander: «que pensez-vous actuellement de la couleur de l'e⁻?», puisque l'état du monde serait dans une superposition après sa réponse. (Pourquoi?)

Fait

La linéarité des opérateurs qui représentent les observables («opérateurs linéaires») implique que si un observable \mathcal{O} de tout système S a la même valeur déterminée dans l'état $|A\rangle_S$ et dans l'état $|B\rangle_S$, alors \mathcal{O} a aussi cette même valeur déterminée dans n'importe quelle superposition linéaire de $|A\rangle_S$ et $|B\rangle_S$. (cf. 117)

- Appliquez ce fait à l'état dans (??) et demandez à l'observatrice de nous dire simplement si l' e^- a l'une des deux couleurs noir ou blanc.
 - Elle confirmera en effet ceci s'elle est une rapporteure compétente: si on obtient $|\langle\langle\text{noir}\rangle\rangle\rangle_o|\langle\langle\text{noir}\rangle\rangle\rangle_m|\text{noir}\rangle_e$, alors elle a une croyance définie et rapportera que l'un d'eux est bien le cas; de façon analogue pour $|\langle\langle\text{blanc}\rangle\rangle\rangle_o|\langle\langle\text{blanc}\rangle\rangle\rangle_m|\text{blanc}\rangle_e$.
 - Selon le Fait, son cerveau sera donc dans un état défini si on obtient la superposition dans (??) et elle le rapportera ainsi.
 - Bizarre: la dynamique linéaire semble impliquer qu'elle va être convaincue qu'elle a une croyance particulière définie sur la couleur de l' e^- !
- ⇒ Si on obtient un état comme (??), alors elle semble s'être «trompée y compris sur ce qu'est son propre état mental en l'état» (118)



"And so it turns out that there was... too much being taken for granted when we got convinced... that there is some particular point in the course of the sort of measurement we've been talking about by which a collapse of the wave function must necessarily already have taken place, some particular point... at which the dynamical equations of motion together with the standard way of thinking about what it means to be in a superposition somehow flatly contradicts what we unmistakably know to be true of our own mental lives." (118f)

Supposons que l'observatrice effectue deux mesures de couleurs successives (m_1 et m_2) sur un e^- initialement dur. En supposant l'observatrice compétente, l'état de post-mesure du système composite ($o \& m_1 \& m_2 \& e$) est

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{les deux résultats sont «noirs»}\rangle_o |\text{«noir»}\rangle_{m_1} |\text{«noir»}\rangle_{m_2} |\text{noir}\rangle_e + |\text{les deux résultats sont «blancs»}\rangle_o |\text{«blanc»}\rangle_{m_1} |\text{«blanc»}\rangle_{m_2} |\text{blanc}\rangle_e) \quad (2)$$

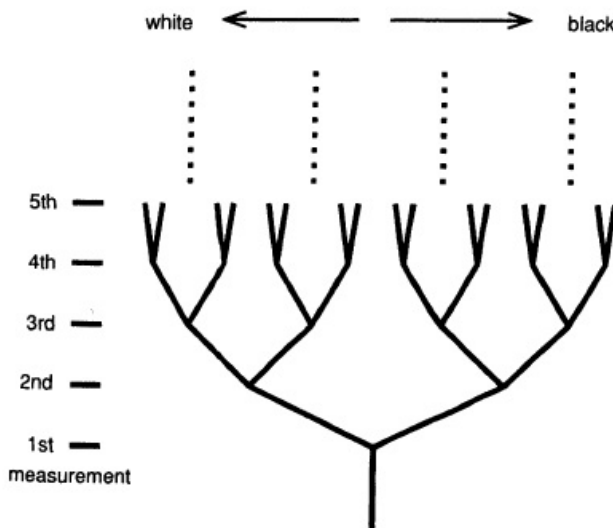
Les questions à poser par l'observatrice sont donc (1) si elle croit que les deux mesures ont des résultats définitifs, et si oui, (2) si elles étaient les mêmes.

Étant donné l'argument précédent, elle devra répondre par l'affirmative aux deux questions.

«Connaissance effective»

- De ce genre d'arguments, on peut voir que si deux observateurs différents devaient effectuer des mesures de couleur successives sur le même e^- particulier initialement dur, "then both of those observers will report, falsely, that the **other** observer has reported some definite particular outcome of **her** measurement, and both of them will report that that reported outcome is completely in agreement with her own." (120)
- ⇒ Si on obtien un état comme (??), alors l'observatrice «**sait effectivement**» quelle est la couleur de l' e^- .
- Faisons le même jeu pour un observateur qui effectue des mesures de couleur sur une collection infinie d' e^- ... (mais faisons cela au tableau noir)

Une série infinie de mesures de couleur



Obtenir les statistiques en retour

- Posons à l'observatrice infinie une autre question: "Tell me whether you believe that each of the first N e^- has a definite color, and if so, tell me what **fraction** of them do you believe to be black."
- L'observatrice «sait effectivement» quelle est la couleur du premier N e^- et donnera donc comme réponse «oui» à la première question.
- Mais la seconde question est plus compliquée, puisque le monde devra être dans une superposition d'états avec l'observatrice donnant différentes réponses à la question.
- Cependant, à long terme, lorsque N tend vers l'infini, "the state of the world will, with certainty, **approach** a state in which [the observer] **will** answer that question in a perfectly **determinate** way, and in which the answer [she] gives will with certainty be '1/2'." (122)
- Il peut être montré que l'état de **pre**-mesure de l'ensemble des e^- est un état propre de l'opérateur correspondant à l'observable \mathcal{O}_N (la fraction des e^- noirs parmi les N premiers e^- mesurés) lorsque N tend vers l'infini, avec une valeur propre 1/2. (Cf. fn. 6, p. 122)
- Mais puisque ce n'est pas un état propre de l'opérateur correspondant à la mesure, l'état de **post**-mesure aura certainement la 1/2 des e^- noirs.

La conclusion de tout cela

*“Suppose that an observer h is confronted with an infinite ensemble of identical systems in identical states and that she carries out a certain identical measurement on each one of them. Then, even though there will actually be no matter of fact about what h takes the outcome of **any** of those measurements to be, nonetheless as those measurements which have already been carried out goes to infinity, the state of the world will approach (as a well-defined mathematical limit) a state in which the report of h about the **statistical frequency** of any particular outcome of those measurements will be perfectly definite, and also perfectly in accord with the standard **quantum-mechanical** predictions about what that frequency ought to be.” (123)*

En d'autres mots, nous pouvons obtenir les bonnes statistiques sans recourir à des effondrement!

Un problème pour la théorie stricte: l'infini

- Problème: ces fréquences ne seront factuelles que dans la limite d'une infinité de mesures. Il n'y a tout simplement pas de faits sur ces fréquences autrement ...
- Mais bien sûr, nous ne pouvons effectuer une série infinie de mesures que si nous avons un temps infini, ou si nous étions infiniment nombreux.
- ⇒ Il n'est pas de question de savoir si nous prenons ou non ces fréquences en accord avec les **prédictions** quantiques standards à ce sujet. (124)
- ⇒ Quelles raisons aurions-nous alors de croire en la MQ?
- ⇒ Albert conclut que la théorie stricte n'est pas «envisageable», c'est-à-dire que l'évolution linéaire de Schrödinger ne donne pas la dynamique vraie et complète.

Développements de la théorie stricte

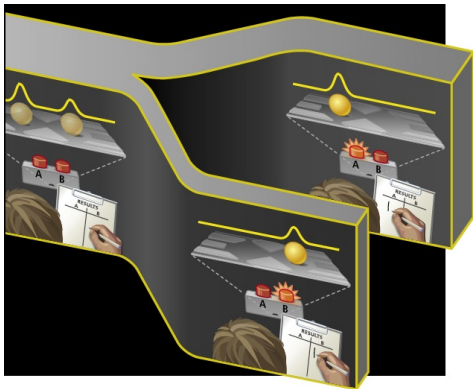
Donc, étant donné que la théorie stricte n'est pas, selon les mots de Barrett, **empiriquement cohérente**, tout comme la formulation originale d'Everett, cherchons des manières de développer le rejet d'Everett du postulat de l'effondrement et de voir où cela nous mène. Options:

- 1 interprétation canonique des mondes multiples de DeWitt
- 2 esprits multiples (Albert, Loewer)
- 3 histoires multiples

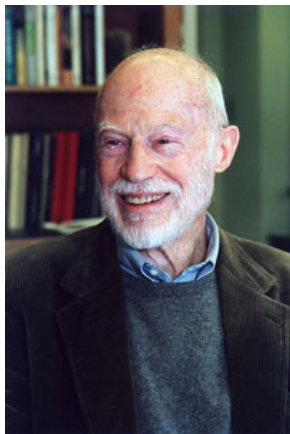
(1) Mondes multiples (Bryce DeWitt)



DeWitt 1970, 1971, 1973.



- La fonction d'onde décrivant le système bifurque à chaque interaction de l'observateur avec l'objet superposé.
- **pas d'interaction** entre les branches (qui contiennent chacune une copie complète du système)
- Explication d'aujourd'hui de la façon dont les branches deviennent indépendantes: théorie de la décohérence (H. D. Zeh)



Bryce DeWitt (1923-2004)

Bien sûr, la division des mondes par DeWitt chaque fois que les états des systèmes deviennent corrélés est contre-intuitive, comme il le reconnaît:

*"I still recall vividly the shock I experienced on first encountering this multiworld concept. The idea of 10^{100} slightly imperfect copies of oneself all constantly splitting into further copies, which ultimately become unrecognizable, is not easy to reconcile with common sense. Here is schizophrenia with a vengeance."
(1973, 161)*

Problèmes de l'approche monde multiples

- 1 **d'interprétation**: très probablement pas comment Everett a conçu sa proposition, puisque la suggestion originale d'Everett n'impliquait pas de **division physique** entre observateurs et d'autres systèmes physiques
- 2 **extravagance ontologique**
- 3 **problème de la base préférentielle**: c'était déjà un des points de la critique d'Albert; c'est un problème sérieux et on ne sait pas encore s'il y a des réponses complètement satisfaisantes; la plupart des partisans de cette approche utilisent la théorie de la décohérence pour résoudre ce problème, c'est-à-dire raconter comment l'interaction du système avec l'environnement (paramètres de l'appareil, etc.) détermine la base de la division.

- ④ **obtenir les bonnes statistiques:** aussi déjà discuté; il existe diverses propositions pour résoudre ce problème, et il est débattu de savoir si elles résolvent le problème. Cependant, ce qui est clair, c'est que la propre proposition d'Everett de concevoir ces probabilités de la même manière que dans la thermodynamique classique ne fonctionne pas sans d'autres hypothèses.
- ⑤ **incompatibilité potentielle avec la relativité restreinte:** en particulier ceux qui soutiennent que les dissensions sont physiques, ont beaucoup de mal à les réconcilier avec la relativité restreinte; c'est un problème profond et complètement non résolu.

(2) Esprits multiples (Albert and Loewer)



D Albert et B Loewer (1988). *Interpreting the many-worlds interpretation*. *Synthese* 77: 195-213.

- Étant les problèmes de la théorie stricte et des interprétations canoniques des mondes multiples, Albert et Loewer (1988) ont proposé une façon alternative de résoudre le problème de la mesure en niant la proposition 1.C de Maudlin: [l'interprétation des esprits multiples](#).
 - Supposons qu'il n'y ait qu'un seul monde avec une histoire complète et vraie de ce qui est.
 - Supposons la complétude (1.A) et la dynamique linéaire (1.B).
 - Supposons que les gens en bonne santé soient des rapporteurs compétents de si ou non ils ont des [états mentaux](#) (tels que «la position du pointeur est telle ou telle»)
- ⇒ Les équations dynamiques impliquent que des personnes en bonne santé dans des superpositions d' [états cérébraux](#) correspondant à différentes croyances sur des positions de pointeurs rapporteront (avec certitude) qu'elles sont dans des états mentaux déterminés au sujet de la position du pointeur...
- ⇒ «quelque chose de drôle sur la façon dont nos états mentaux surviennent sur les états cérébraux» (126)

Regardons de plus près

- L'évolution des états cérébraux est en accord avec l'équation déterministe de Schrödinger, mais l'évolution des états mentaux est **probabiliste**.
- L'observatrice débute avec $|\text{prête}\rangle_o$, l'état de son cerveau sera dans une superposition de $|\text{«noir»}\rangle_o$ et $|\text{«blanc»}\rangle_o$, mais l'état mental post-mesure sera soit l'état mental correspondant à $|\text{«noir»}\rangle_o$ **soit** l'état mental correspondant à $|\text{«blanc»}\rangle_o$ (avec des probabilités égales).

*“Whatever belief [she] **does** end up with, when [(??)] obtains, is necessarily going to be a false belief. But there are very natural ways of cooking things up so as to guarantee that that belief will nonetheless have an important kind of **effective validity**, at least in so far as [she] is concerned... there are ways of cooking things up... so as to guarantee that the future evolution of [her] mental state will proceed... exactly **as if** [her] beliefs **were** true.” (127)*

Voici ce que cela signifie:

- Supposons qu'elle effectue deux mesures de couleur sur l' e^- dur.
- Après la première mesure, elle a l'état mental déterminé de croire que le premier résultat était «noir» (ou «blanc»).
- Après la deuxième mesure, l'état physique sera (??), et elle se retrouvera avec la croyance déterminée que les deux résultats étaient «noirs» (ou les deux résultats étaient «blancs»).
- Mais c'est exactement ainsi que son état mental **aurait** été, avec certitude, **si sa croyance que le premier résultat était «noir» aurait été vraie**.
- Et il en est ainsi de façon très générale.

*“On this proposal, quantum-mechanical wave functions are complete descriptions of the physical state of things, and those wave functions invariably evolve in perfect accordance with the dynamical equations of motion, and it makes no physical difference at all what **basis** we choose to write those wave functions **down** in, and measurements carried out by sentient observers (that is: by observers with **minds**) invariably have determinate **outcomes** in the minds of those observers, and the statistical **distributions** of those outcomes will be the usual quantum-mechanical ones, and there isn't anything mysterious about how **probabilities** come up in the theory, and the **reports** of sentient observers about their own mental states will invariably... be **correct**.” (129, footnotes suppressed)*

Quelques conséquences...

- forme grave de dualisme: tous sauf un des termes dans une superposition comme (??) représentent des «carcasses sans esprit» (et lequel d'entre eux n'est pas sans esprit ne peut pas être déduit de la connaissance complète de l'état physique)
 - Correction: «tout système physique sensible est associé non pas à un seul esprit, mais plutôt à une **infinité continue** d'esprits...» (130)
 - L'évolution dynamique des esprits est probabiliste de manière à produire les bonnes statistiques de la MQ.
 - L'évolution des esprits multiples connectés à un observateur sensible **en tant qu'ensemble** évolue toujours de façon déterministe.
- ⇒ Sur cette proposition, les états «globaux» des observateurs sensibles sont uniquement déterminés par l'état physique du monde.

- Il n'y a pas de base **physiquement** préférée, seulement une base **mentalement** préférée.
 - C'est une des rares interprétations de la MQ qui est manifestement compatible avec la relativité restreinte (mais seulement dans le domaine physique).
 - On peut la considérer comme une théorie à VC, avec les états mentaux comme variables supplémentaires.
- ⇒ Ceci est suffisant pour donner aux observateurs des enregistrements déterminés.
- C'est un peu comme si tous les problèmes (base préférée, compatibilité avec la relativité restreinte, création d'enregistrements déterminés, etc.) sont simplement poussés dans le domaine mental...

Encore une chose:

Selon cette approche, la physique est en quelque sorte **locale**, en contradiction apparente avec le théorème de Bell. Vous devriez regarder de plus près, en considérant un état de type EPR.

Faiblesse et problèmes

Cette approche a des faiblesses et des problèmes:

- Elle implique que les croyances des observateurs sensibles seront typiquement fausses. Albert: “Nothing, even in principle, can be done about that.” (132)
- The “sum total of what any particular... observer’s **minds** can conclude about the overall quantum state of the world”, given the outcomes of any experiments she might perform, is only that the state of the world “is not orthogonal... to the **effective** state that those outcomes **pick out**.” (133)
- Mais le problème le plus sérieux, pour la plupart des commentateurs, est le profond dualisme corps-esprit qui est impliqué par cette approche. Barrett se demande “whether the sort of mental supervenience one gets in the many-mind formulation [...] is worth the trouble of postulating a continuous infinity of [non-physical] minds associated with each observer.” (Barrett 2004)



Jeffrey A Barrett (2004). Many-worlds and many-minds formulations of quantum mechanics. *Encyclopedia of Philosophy*, Macmillan Reference USA.