

Bourbaki
9 avril 2005

EINSTEIN 1905-1955.

SON APPROCHE DE LA PHYSIQUE

Thibault Damour

Institut des Hautes Etudes Scientifiques

EINSTEIN ET L'ÉPISTÉMOLOGIE

L'épistémologie et la science (Einstein 1949, trad. M. Paty)

« L'épistémologie, en l'absence de contact avec la science, devient un schéma vide. La science sans épistémologie est — pour autant qu'elle soit alors seulement pensable — primitive et embrouillée. Cependant, à peine l'épistémologue, qui recherche un système clair, s'est-il frayé un chemin vers un tel système, qu'il est tenté d'interpréter le contenu de la pensée de la science dans le sens de son système et de rejeter tout ce qui n'y entre pas. Le scientifique, quant à lui, ne peut pas se permettre de pousser aussi loin son effort en direction d'une systématique épistémologique. Il accepte avec reconnaissance l'analyse conceptuelle de l'épistémologie; mais les conditions externes, qui interviennent pour lui au travers des faits de l'expérience, ne lui permettent pas de se laisser trop restreindre dans la construction de son monde conceptuel par l'adhésion à un système épistémologique quel qu'il soit. Il doit donc apparaître à l'épistémologue systématique comme une espèce d'opportuniste sans scrupule; il apparaît comme un **réaliste** dans la mesure où il cherche à décrire un monde indépendant des actes de la perception; comme un **idéaliste** dès lors qu'il considère les concepts et les théories comme des libres inventions de l'esprit humain (celles ne peuvent être déduites logiquement du donné empirique); comme un **positiviste** s'il considère que ses concepts et ses théories ne sont justifiés que dans la mesure où ils fournissent une représentation logique des relations entre les expériences des sens. Il peut même apparaître comme un **platonicien** ou un **pythagoricien** s'il considère que le point de vue de la simplicité logique est un outil indispensable et effectif de la recherche. »

EINSTEIN ET LA PHILOSOPHIE

B2

« Un goût très vif pour la philosophie » E. à Solovine

- Einstein au Polytechnicum (ou avant) \approx 1900

Kant , Mach , Spinoza , Schopenhauer,
Berkeley, Galilée, Boltzmann, Helmholtz, Hertz

- Einstein à Berne 1902-1904: « Académie Olympia »

E. Mach: « L'analyse des sensations », « La mécanique, exposé historique et critique... »

John Stuart Mill: « Logique »

David Hume: « Traité de la nature humaine »

Karl Pearson: « Grammaire de la Science »

Richard Avenarius: « Critique de l'expérience pure »

André Marie Ampère: « Essai sur la philosophie des sciences »

Henri Poincaré: « Science et Hypothèse »

Bernhard Riemann: « Sur les fondements de la géométrie »

Clifford: « Sur la nature des choses en elles-mêmes »

Dedekind: « Que sont les nombres et à quoi servent-ils ? »

+ Platon

Leibniz

+ Sophocle, Racine, Cervantès

- Plus tard Einstein discute avec ou lu
Russell, Bergson, Meyerson, Cassirer, Carnap,
Reichenbach, ...

DAVID HUME (1711-1776)

B3

- vient après Newton, Locke, Berkeley
- pose la question fondamentale:
« Comment connaissons-nous ? »
- examine de façon critique l'origine et le contenu de notions générales comme espace, relation, substance, causalité
- Sceptique, il met en doute le fondement logique de l'idée que la science abstrait, par une logique inductive, des lois générales à partir de l'expérience.
- Par exemple, il considère que la causalité est fondée non sur la nécessité logique mais sur l'habitude.

Einstein 1949. « Hume a vu que des concepts que nous regardons comme essentiels, comme par exemple celui du lien de cause à effet, ne pourraient pas être tirés du matériel fourni par les sens. [...] L'homme aspire à des connaissances sûres. C'est pourquoi le message si lumineux de Hume apparut comme une catastrophe: le matériel sensoriel brut, seul source de notre connaissance, peut mener par habitude à la croyance et à l'expectative, mais pas au savoir ni a fortiori à la compréhension de relations fondées sur des lois. Vint alors Kant ... »

EMMANUEL KANT (1724 - 1804) ^{B4}

- réfléchit sur les idées de Newton, Leibniz, Hume
- approfondit la nature des connaissances scientifiques, et des objets et structures fondamentales de la science : espace, temps, matière, force, causalité
- une profonde révolution conceptuelle: Crit. Raison Pure, ¹⁷⁸⁷ 2^{ème} éd, Préface
« On a admis jusqu'ici que toutes nos connaissances devaient se régler sur les objets; [...] Que l'on cherche donc une fois si nous ne serions pas plus heureux dans les problèmes de la métaphysique, en supposant que les objets se règlent sur notre connaissance, [...]. »

Il conçoit l'objectivité et la certitude de la connaissance comme résultant de conditions que lui imposent les exigences du sujet qui connaît.

- Par ex, l'espace et le temps ne sont plus pensés par lui comme des réalités physiques qui existent avant et à côté de la matière, mais comme des formes a priori de la sensibilité humaine qui servent de fondements idéaux pour penser et représenter la réalité.
- Einstein 1936 reconnaît que le grand mérite de Kant est d'avoir affirmé l'intelligibilité du monde comme condition nécessaire à sa représentation scientifique: « C'est l'un des grands accomplissements de Kant d'avoir montré qu'il serait dénué de sens de poser l'existence d'un monde extérieur réel sans cette intelligibilité. »

ERNST MACH (1838-1916) ^{B5}

- un physicien qui s'est préoccupé de la critique historique des concepts fondamentaux de la physique, et s'est intéressé à la psychophysologie des sensations.
 - a développé une épistémologie empiriste, critique et positiviste, prônant une réduction phénoménaliste aux sensations et rejetant toute "métaphysique".
 - critique décapante des a priori de la mécanique newtonienne: temps absolu, espace absolu, mouvement absolu.
 - insiste sur la nécessité de s'en rapporter à la possibilité d'observations expérimentales
 - Mach: « Pour moi, il n'y a que des mouvements relatifs: »
Expérience du seau tournant de Newton
 - "Principe de Mach": L'inertie des corps résulte de leur interaction avec les autres corps répartis dans l'Univers (lointain).
 - Einstein: « Ce livre me fit une impression profonde et durable dans la mesure où il était orienté vers les lois et les concepts fondamentaux. »
- mais aussi:
- Einstein: Mach était « un piètre philosophe »

HENRI POINCARÉ (1854-1912) ^{B6}

- un mathématicien qui mena une réflexion profonde sur les fondements des mathématiques
- un physicien-mathématicien qui s'est aussi interrogé sur certains des fondements de la physique
- ses livres de vulgarisation (notamment "La science et l'hypothèse" 1902) eurent un grand succès d'édition ($\geq 16\ 000$ ex)
- défend le **conventionalisme**: cad que le scientifique a le **libre choix de ses principes fondamentaux**
- par ex. pour la géométrie de l'espace
 - Poincaré parle des géométries non euclidiennes (avec groupe de symétrie)
 - il analyse les fondements physiologiques et observationnels de la géométrie
 - mais il conclut que l'on gardera toujours la géométrie euclidienne!car le choix d'une géométrie est une convention arbitraire, et il juge la géométrie euclidienne le choix le plus commode
- Einstein cite chaleureusement l'influence de la lecture de «La science et l'hypothèse» du «profond et sagace» Poincaré sur son invention de la Relativité Générale.

EINSTEIN ET POINCARÉ

87

voir aussi "Si Einstein m'était conté"
et hep-th/0501168

- certains auteurs ont suggéré qu'Einstein aurait lu, avant 1905, un article de Poincaré publié dans le Festschrift de Lorentz (1900) et la Note au CRAS de P. soumise le 5 juin 1905 [l'article d'E. sur Relat. Rest. a été reçu par Ann Phys. le 30 juin 1905]

Notons

- qu'E. a cité plusieurs fois et chaleureusement l'importance de la lecture de «Sci et Hypothèse»
 - E. travaillait 8h x 6 jours et n'avait pas accès à une bibliothèque scientifique
- ≡ 1907 « La bibliothèque [de Berne] est fermée à mes heures de liberté »
à Stark
- P. qui, en revanche, avait toutes les facilités possibles pour avoir accès à la littérature scientifique, ignorait l'existence de l'article d'E sur RR en 1906-1907, et aussi, semble-t-il, en 1909 (Göttingen). Sont ses auditeurs de Göttingen (1909), soit Mittag-Leffler (1909) attirèrent son attention sur l'existence du travail d'E.
 - les approches de P. et d'E. au "principe de relativité" sont complètement différentes:
 - P. voyait le "principe de relativité" comme un "théorème" à démontrer à partir d'une dynamique microscopique sous-jacente
 - E. concevait le "principe de relativité" comme un "axiome" de départ, définissant une nouvelle cinématique, et contraignant a priori les lois de la physique.
- 1911, Solvay; seule conversation entre P. et E. sur la RR:
- « P.: « Quelle mécanique adoptez-vous dans vos raisonnements? » [Maurice de Broglie]
- E.: « Aucune mécanique », ce qui parut surprendre son interlocuteur »
- P. n'a jamais pensé ni proposé qu'a "dilatation des temps" marqués par horloges en mouvt ≠ E.
 - P. 1912: « Aujourd'hui certains physiciens veulent adopter une convention nouvelle (3) ceux qui ne sont pas de cet avis peuvent légitimement conserver l'ancienne pour ne pas troubler leurs vieilles habitudes. Je crois, entre nous, que c'est ce qu'ils feront encore longtemps. »

L'ÉPISTÉMOLOGIE ÉCLECTIQUE D'EINSTEIN 88

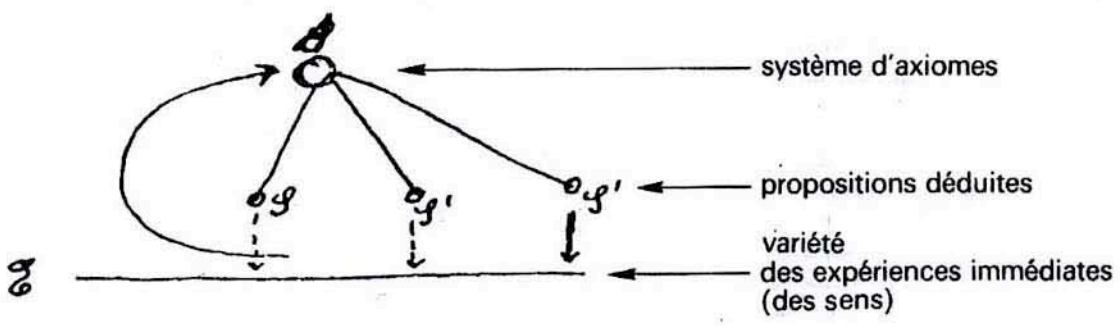
- Einstein a su « faire son marché » chez les grands penseurs de la science, et y trouver des éléments libérateurs pour ses recherches en physique, en évitant toute crispation dogmatique
- Le scepticisme de Hume désacralisait les grands absolus conceptuels, et invitait à chercher les « habitudes » sur lesquelles ils reposaient. Mais, il ne faut pas tomber dans un scepticisme universel
- Le rationalisme de Kant invitait à chercher l'origine des cadres scientifiques fondamentaux dans le pouvoir d'intelligibilité du sujet connaissant. Mais, il faut mettre en doute le caractère a priori de ces cadres fondamentaux
- Le positivisme de Mach invitait à mettre en question les absolus newtoniens et à exprimer la physique en termes de concepts qui peuvent être reliés à des observations expérimentales. Mais, il ne faut pas exiger que chaque concept soit directement lié à des observations
- Le conventionalisme de Poincaré insistait sur le libre choix des concepts scientifiques fondamentaux, et, en même temps, sur l'origine physiologico-expérimentale de la géométrie. Mais, libre choix ne veut pas dire choix arbitraire, ou choix le plus commode, car la réalité peut suggérer des choix privilégiés.

L'ÉPISTÉMOLOGIE SPÉCIFIQUE D'EINSTEIN ^{B9}

- (i) E. insiste sur la recherche de **principes généraux** de la nature, et sur le caractère **fructueux** qu'il y a à contraindre les lois de la nature en imposant, comme hypothèse de départ, de tels principes.
- (ii) E. précise que « le chercheur doit extraire ces principes généraux de la nature en percevant dans des ensembles complexes de faits d'expérience certains caractères généraux qui permettent une formulation précise. »
- (iii) E. précise que le choix de ces principes fondamentaux, ou des concepts scientifiques de base, est une **libre invention** de la pensée qui ne peut pas être déduite logiquement de la masse des faits expérimentaux, mais qui est cependant fortement contrainte par celle-ci.

Exemples d'application :

- (i) "principe de relativité" et RR, "principe d'équivalence" et R.G.
(ii) peu d'importance de Michelson-Morley ou Fötvös car « complexe de faits »
(iii) R.G. et espace-temps courbe



EINSTEIN ET LA THÉORIE QUANTIQUE B11

- Vision habituelle: ≥ 1927 Einstein s'est bloqué dans des préjugés épistémologiques ("réalisme naïf") qui l'ont empêché de comprendre la révolution conceptuelle et épistémologique ("complémentarité") de la théorie quantique.
- Je pense, au contraire, qu'Einstein, loin d'être bloqué dans des a priori dépassés, avait une vision plus profonde et plus exigeante de ce que doit être une théorie physique que certains des physiciens quanticiens qui se satisfaisaient d'une vision purement positiviste de la physique.
- Les grands progrès historiques (1926-7, 1935, 1954-5) dans l'interprétation de la théorie quantique ont été suscités par Einstein, et étaient enracinés dans son approche « kantienne » de la pensée de la science

EINSTEIN

- a lu et médité Kant, Spinoza, Hume, Poincaré, ...
- avait un grand respect pour la philosophie et les philosophes, même s'il considérait que la science moderne nous avait montré qu'il fallait faire descendre du piédestal de l'*a priori* les conceptions newtoniennes de l'espace et du temps.
- cherchait la *clarté* logique en science, et particulièrement en Théorie Quantique (TQ)
- exigeait que l'interprétation de la TQ sorte du formalisme: e.g. 1932 à Pauli:
« Au demeurant je ne dis pas *probabilitatem esse delendam*, mais *probabilitatem esse deducendam*, ce qui n'est pas la même chose »
- cherchait à comprendre la « réalité » (mais pas en un sens « naïf ») et se plaignait de la « philosophie légalisante du langage » de Bohr: 1935 à Schrödinger
« Quant au philosophe talmudiste, il se fiche pas mal de la « réalité », cet épouvantail tout juste bon à effrayer les âmes naïves. Il explique que les deux conceptions [sur la TQ] ne diffèrent que par leur mode d'expression. »

5

BOHR

- n'a jamais lu un philosophe
- après avoir assisté à un congrès de philosophie:
« J'ai fait une grande découverte, une très grande découverte: tout ce que les philosophes ont jamais écrit me sont que des imbécillités [ou « sornettes »] »
- était très fier de son idée de « *complémentarité* », que je considère comme *obscur* et *a-logique*
- donnait une fin de non recevoir à toute exigence de déduction des statistiques de phénomènes observés.
- refusait le concept de « réalité »:
« There is no quantum world. There is only an abstract quantum physical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature. »

EINSTEIN, HEISENBERG ET LES «RELATIONS D'INCERTITUDES»

Berlin, début 1926 : CONVERSATION CRUCIALE ENTRE
EINSTEIN ET HEISENBERG

HEIS... ... Puisqu'il est raisonnable de n'inclure dans une théorie que les grandeurs qui peuvent être observées, il m'a semblé naturel de n'introduire que ces fréquences [$\nu_{nm} = (E_n - E_m)/h$] et amplitudes [a_{nm}], pour ainsi dire en tant que représentants des orbites électroniques.

EIN... — Mais vous ne croyez tout de même pas sérieusement que l'on peut inclure dans une théorie physique que des grandeurs observables.

HEIS — Je pensais que c'est vous, précisément, qui avez fait de cette idée la base de votre théorie de la relativité : temps absolu → indications d'horloges

EIN — Peut-être en effet ai-je utilisé cette sorte de philosophie, mais il n'en reste pas moins qu'elle est absurde. Heuristiquement OK, mais en fait : **C'est seulement la théorie qui décide de ce qui peut être observé.**



- LEÇON APPRISE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE
- A JOUÉ UN RÔLE CRUCIAL DANS LA DÉCOUVERTE DES «RELAT. D'INCERTITUDES»

SUR L'INTERPRÉTATION DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

- APRÈS LA RR, LA CONSTRUCTION de la RG par Einstein l'a conduit dans des années de grande confusion
- jusqu'à ce qu'il comprenne que c'est la théorie elle-même qui définit ce qui est observable, et donc sa propre interprétation.
- aujourd'hui, si vous ouvrez un (bon) ouvrage sur la RG vous ne trouverez pas un chapitre sur « les interprétations » de la RG. Car il n'y en a qu'une : celle définie par la RG
- seuls certains esprits confus, prétendent exclure/modifier certaines prédictions de la RG en introduisant des « fantômes » irréels comme un espace-temps absolu, plat, de fond.
- le fait qu'aujourd'hui de bons livres sur la TQ aient un chapitre sur les interprétations de la TQ vient de
 - manque de clarté « philosophique » sur la notion kantienne de réalité
 - une peur existentielle à « réaliser » le caractère illusoire de notions du sens commun. [Déjà le cas avec RR et TEMPS]
 - une plus grande complexité technique pour « expliquer les phénomènes »

Copenhague, février 1927

Après Schrödinger ($i\hbar \partial_t \psi = \hat{H} \psi$, début 1926)

Born (été 1926 : $|\psi|^2 \sim$ probabilité) qui partait d'une idée d'Einstein

Born : « Je pars d'une remarque d'Einstein sur la relation entre champ d'onde et quanta de lumière ; il [Einstein] dit à peu près que les ondes servaient seulement à piloter les corpuscules lumineux, et il parla en ce sens d'un « champ fantôme » déterminant la probabilité qu'un quantum lumineux... prenne tel ou tel chemin... »

- Heisenberg et Bohr discutent intensément de l'interprétation de la TD, et, en particulier, de la compatibilité entre ondes et corpuscules.

HEISENBERG : « Ce soir là, ce fut peut-être aux environs de minuit que je me rappelai brusquement ma discussion avec Einstein, et que je me souvins de sa phrase : « Seule la théorie décide de ce que l'on peut observer. ». Je réalisais alors immédiatement que c'est dans cette remarque qu'il fallait chercher la clef de l'énigme qui nous [Bohr et Heisenberg] avait tant préoccupés. »

⇒ HEISENBERG TROUVE AINSI LES RELATIONS D'INCERTITUDE

- Bohr revient du ski, grisé par l'« idée de complémentarité »
- ⇒ tension très vive entre Heisenberg et Bohr
- mais, finalement, Heisenberg décide de « s'écraser », mais de publier séparément son article sur les « Relat. d'Incert. »

1935 EPR + LE BARIL DE POUDRE D'EINSTEIN ET LE CHAT DE SCHRÖDINGER

• début 1935: Einstein, Podolsky, Rosen

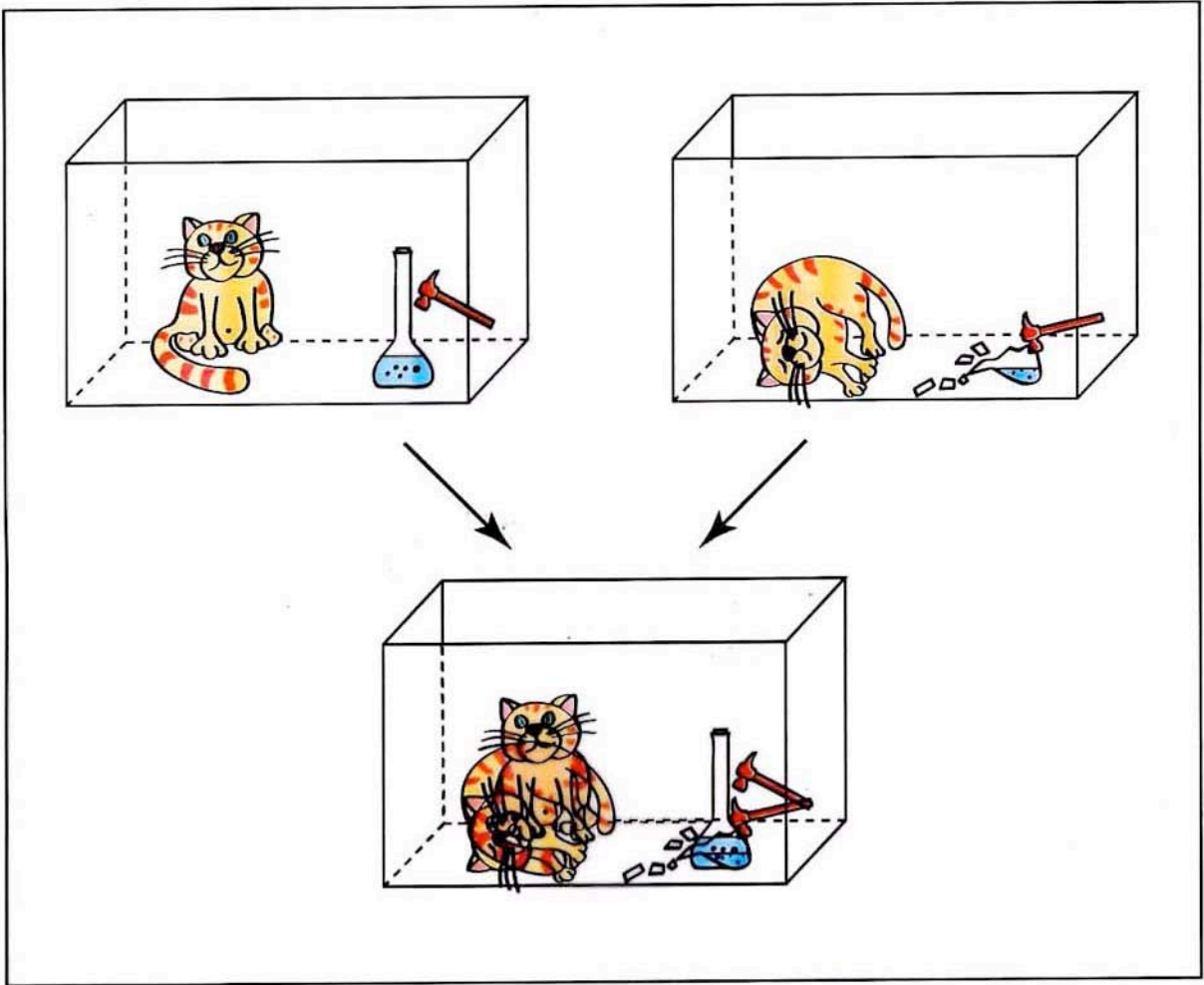
- ⇒ - compréhension du caractère «non-local» de la «réalité quantique»
 «enchevêtrement quantique» ou «intrication quantique»
 - EPR + BELL: physiciens qui veulent comprendre, et qui posent le problème en termes testables par l'observation
 - >< attitude rigide de Bohr, figé dans le jargon de la complémentarité:

Einstein à Schrödinger 1935: «[Bohr =] un mystique interdisant tout questionnement sur quoi que ce soit qui existerait indépendamment de l'observateur...»

• milieu 1935: discussion épistolaire entre Einstein et Schrödinger

Einstein conçoit le baril de poudre instable, et dans un état de superposition, mi-intact, mi-explosé

⇒ Schrödinger rend plus visiblement quantique le mécanisme d'instabilité microscopique et conçoit son chat mi-vif, mi-mort



EINSTEIN ET EVERETT

- Princeton, 14 avril 1954 : LE DERNIER SÉMINAIRE D'EINSTEIN

Einstein parla, devant un groupe d'étudiants, de la théorie quantique. Quel est réellement le sens de l'amplitude de probabilité $\Psi(t, q)$? Donne-t-elle une description complète de la situation physique? Exemple d'une bille macroscopique oscillant entre deux parois.

Ein: « Il est difficile de croire que cette description est complète. Elle semble rendre le monde nébuleux à moins que quelqu'un, comme une souris, le regarde. Est-il croyable que le regard d'une souris puisse changer considérablement l'univers? »

- Hugh Everett III assistait au séminaire, et fut frappé par le questionnement d'Einstein, et en particulier, l'image de la souris.
- Quelques mois plus tard, dans une conversation avec C.W. Misner et A. Peterson, Everett a l'intuition de son « interprétation ».
- 1955-1957 Everett écrit un long traité sur son « interprétation »
- J. Wheeler (« très gêné à la pensée de montrer ce texte, dans son état actuel, à Bohr ») l'oblige à résumer son idée dans un texte court.
- 1959, Everett visite Bohr à Copenhague, mais Bohr n'était pas intéressé et ne laissa jamais Everett lui expliquer l'idée en détail
- l'interprétation d'Everett tombe dans l'oubli complet
- 1970 Bryce DeWitt ressuscite l'idée d'Everett.

LE KANTIQUE DU QUANTIQUE

- Kant :
« Les objets se règlent sur notre connaissance »
- Einstein :
« C'est la théorie qui décide de ce qui est observable »
- Réalité \leftrightarrow Res = Chose = Objet
« La Réalité se règle sur notre connaissance »
autrement dit

C'est la Théorie qui définit la Réalité (Heidegger)
- Paros: La « Réalité Quantique » est définie par le formalisme de la Théorie Quantique
- Donc: il y a une seule interprétation (minimale) possible de la théorie quantique, et c'est celle d'Everett: "Universal Wave Fun"
- Elle suit les préceptes / exigences d'Einstein, notamment:
« probabiliter esse deducendam »
- Si Einstein avait vécu quelques mois de plus, je pense que l'interprétation d'Everett l'aurait réconcilié avec la Théorie Quantique, dont il avait été l'initiateur crucial en 1905-1906, et dans laquelle il avait été le premier à introduire les probabilités (en 1916).
- le statut d'« illusion » de l'unicité de la réalité n'avait pas de raison de lui faire peur, lui qui pensait le Temps comme « illusion, si tenace soit elle »