

*PEUT-ON COMPRENDRE  
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?*

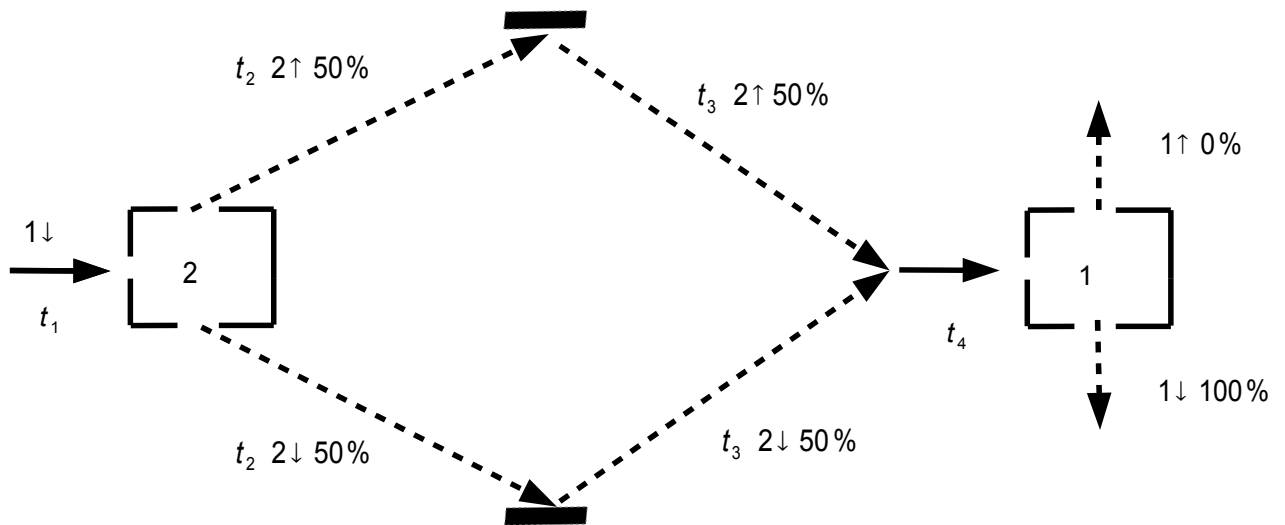
Jean BRICMONT

SAPHYBRU,  
21 OCTOBRE 2017

DEUXIÈME COURS :  
CE QUE BELL (1964) ET EINSTEIN  
(1935) ONT VRAIMENT DIT

# RÉSUMÉ DU COURS PRÉCÉDENT: LA SUPERPOSITION.

La façon dont on décrit des phénomènes bizarres comme l'interféromètre de Mach-Zehnder est d'associer des vecteurs ou des fonctions à des états physiques.



1. Caractérisation de l'état d'un système et de son évolution en dehors des mesures.

$$\begin{aligned} |\text{état } \rangle &= c_1(t) |1 \uparrow\rangle + c_2(t) |1 \downarrow\rangle \\ &= d_1(t) |2 \uparrow\rangle + d_2(t) |2 \downarrow\rangle \end{aligned}$$

$c_1(t), c_2(t), d_1(t), d_2(t)$   
varient au cours du temps  
( $\sim$  équation de Schrödinger)

$$|c_1(t)|^2 + |c_2(t)|^2 = 1$$

$$|d_1(t)|^2 + |d_2(t)|^2 = 1$$

$$(\text{ci-dessus } |c_1| = |c_2| = |d_1| = |d_2| = \frac{1}{\sqrt{2}})$$

*Si on mesure le spin dans la direction 1:*

On obtient:

↑ avec probabilité  $|c_1|^2$

↓ avec probabilité  $|c_2|^2$

$$(|c_1(t)|^2 + |c_2(t)|^2 = 1)$$

*Si on mesure le spin dans la direction 2:*

On obtient:

↑ avec probabilité  $|d_1|^2$

↓ avec probabilité  $|d_2|^2$

$$(|d_1(t)|^2 + |d_2(t)|^2 = 1)$$

Après la mesure dans la direction 1:

si on “voit” ↑

$$|\text{état}\rangle \rightarrow |1\uparrow\rangle$$

si on voit ↓

$$|\text{état}\rangle \rightarrow |1\downarrow\rangle$$

idem pour mesure dans la direction 2 :

“Réduction de l'état”.

Cette réduction de l'état est *incompatible* avec *l'évolution de Schrödinger*.

On a deux règles de l'évolution de l'état mutuellement incompatibles; l'une sur ce qui se passe "en dehors des mesures", l'autre sur ce qui se passe "lors de mesures".

En dehors des mesures, l'évolution de l'état est déterministe et linéaire.

Lors des mesures, l'évolution de l'état est indéterministe et non-linéaire.

# PROBLÈMES

1. L'état n'a pas de signification intuitive.

L'état du système ne représente pas (dans la vision standard, orthodoxe) la probabilité que le système *ait* telle ou telle propriété ou qu'il *soit* en tel ou tel endroit, mais seulement qu'une "mesure" produise tel ou tel résultat.

2. Il change de façon différente lorsqu'on mesure quelque chose et lorsqu'on ne mesure pas. L'observation est un *deus ex machina* dans la version orthodoxe. Elle mène au paradoxe du "chat".

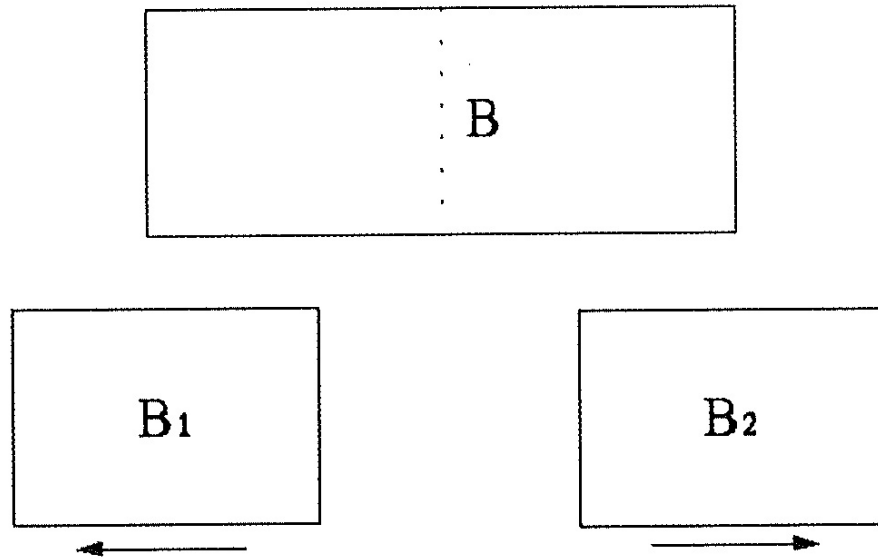
Les théorèmes sur les variables cachées montrent qu'il n'est pas facile d'interpréter l'état quantique comme assignant une distribution de probabilité aux propriétés que pourraient posséder les systèmes quantiques.



3. Le formalisme permet de calculer les résultats de mesure mais rien d'autre. Anthropocentrisme? Subjectivisme? Solipsisme?

Einstein a toujours été opposé à cette vision des choses, mais ses objections n'ont souvent pas été comprises.

## Les boîtes d'Einstein



Une unique particule se trouve dans la boîte  $B$ , dans laquelle on insère une barrière qui coupe la boîte en deux,

$$|\text{état}\rangle = |B\rangle$$

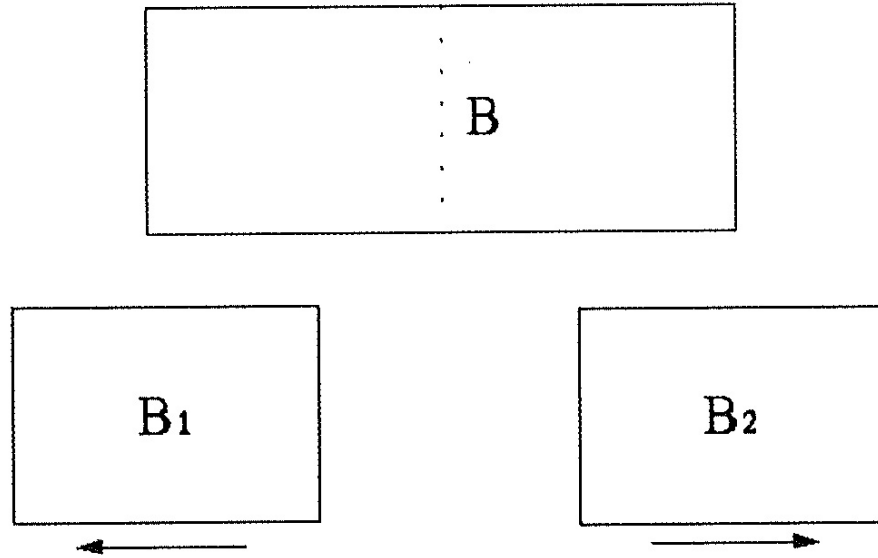
L'état de la particule devient

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|B_1\rangle + |B_2\rangle) \text{ où } |B_1\rangle = \text{la particule "est" dans la boîte } B_1.$$

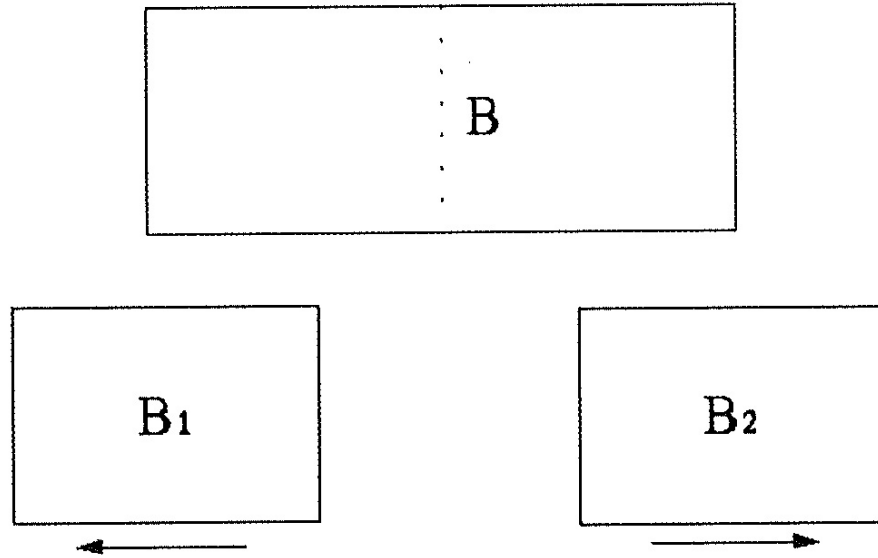
Que veut dire “est” dans la boîte  $B_1$ ?

-Elle est dans la boîte  $B_1$  tout court.

-Elle sera trouvée dans la boîte  $B_1$  si on  
regarde.



Les deux demi-boîtes résultantes,  $B_1$  et  $B_2$  sont ensuite séparées, aussi loin que l'on veut. Si on ouvre une des boîtes (mettons  $B_1$ ), et qu'on n'y trouve *pas* la particule, on *sait* qu'elle se trouve en  $B_2$ . Par conséquent, l'état se "réduit" instantanément et de façon non locale.



On ouvre la boîte  $B_1 \longrightarrow$  rien

c'est une mesure, donc

état  $\longrightarrow |B_2 \rangle$

(et si on ouvre la boîte  $B_2$ , on y trouve la particule évidemment !).

Est-ce que

| état  $\rangle$  = représente une réalité physique  
ou est-il “épistémique” c’est-à-dire ne reflète-  
t-il que notre connaissance ?

Si physique  $\longrightarrow$  non localité. Ouvrir une  
boite affecte la situation physique de l’autre  
boîte: la particule est “créée” instantanément  
dans l’autre boîte.

Si épistémique  $\longrightarrow$  MQ = incomplète, c’est-  
à -dire qu’il existe des “variables cachées”,  
qui complèteraient la description quantique  
et qui, ici, détermineraient *dans quelle boîte*  
*se trouve la particule avant qu’on ouvre*  
*une des boîtes.*

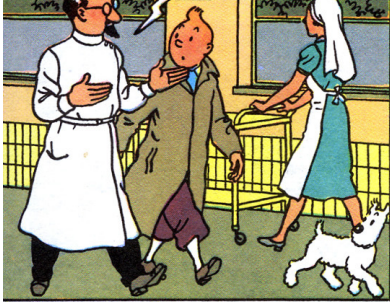
## Qu'est-ce que la Localité ?

PAS D'ACTION À DISTANCE. QU'EST-  
CE QU'UNE ACTION À DISTANCE ? EX-  
EMPLE:

LES 7 BOULES DE CRISTAL



En ce moment, d'importantes  
sommités du monde médical  
sont à leur chevet, attendant  
que le phénomène se produise...

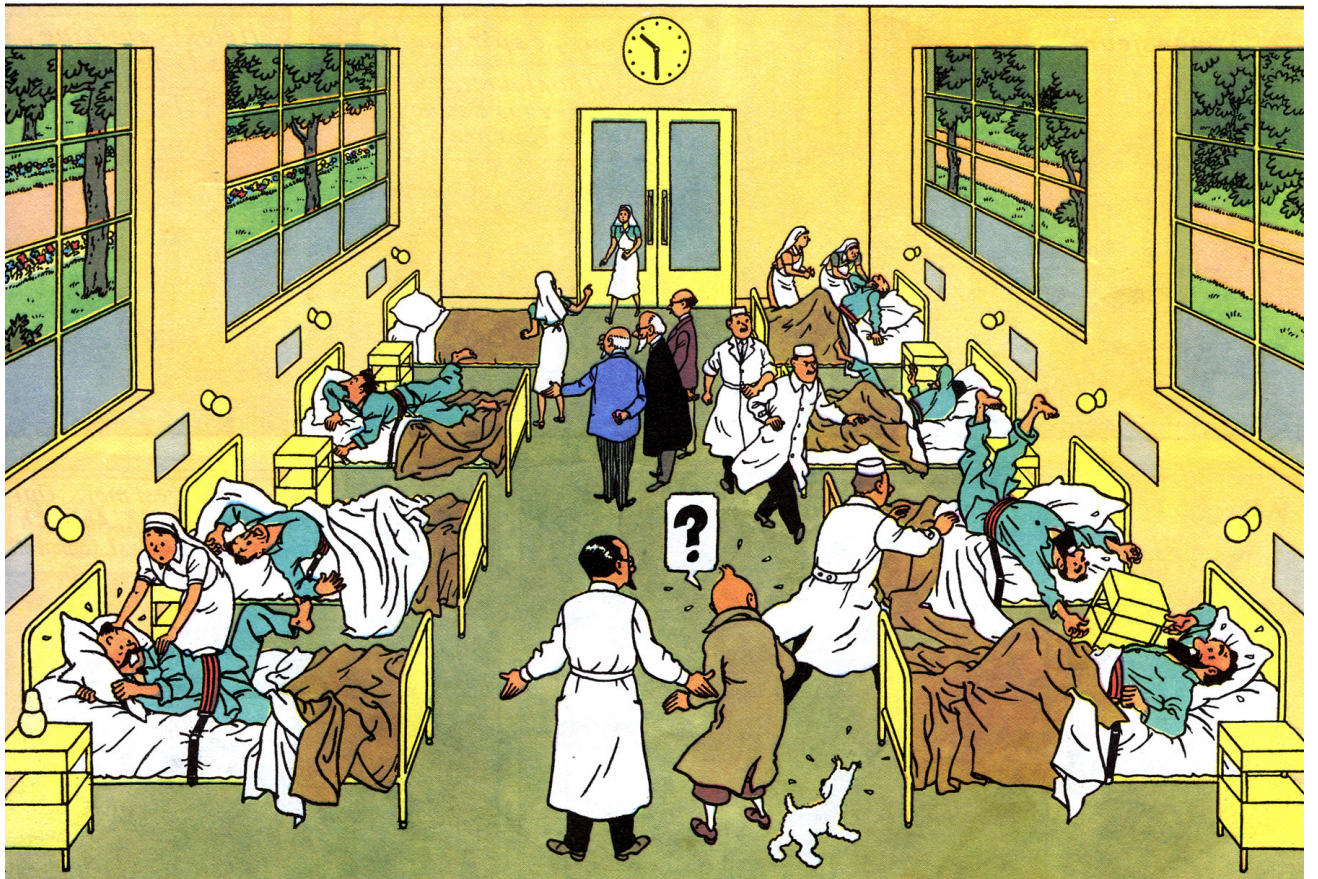
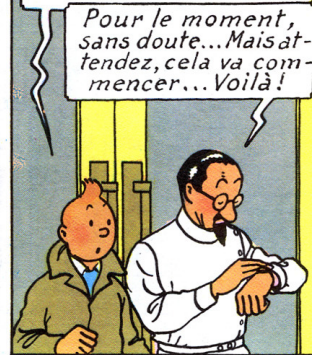


Voici les malades... Vous allez voir...



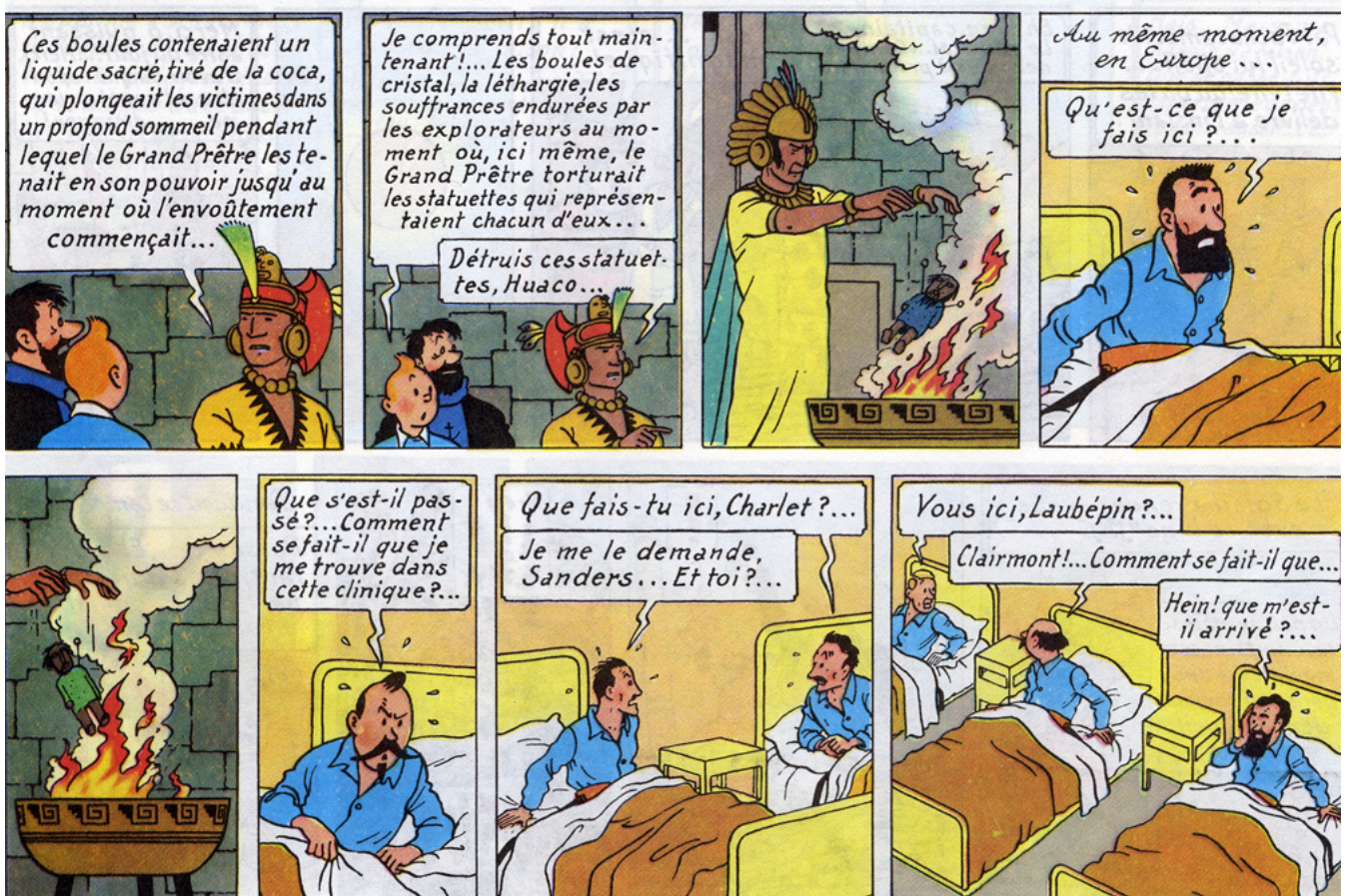
Mais ils ont tous l'air  
absolument calmes.

Pour le moment,  
sans doute... Mais at-  
tendez, cela va com-  
mencer... Voilà!





# ET LE TEMPLE DU SOLEIL



## Propriétés

1. Instantanée
2. a. À portée arbitrairement longue  
b. L'effet ne décroît pas avec la distance
3. Individué
4. Permet de transmettre des messages

La force de gravitation de Newton a les propriétés 1, 2a et 4: la force de gravitation universelle dépend *instantanément*, à *chaque instant*, de la distribution des masses dans tout l'univers.

La physique post-newtonienne, fondée sur l'idée de *champs* (électromagnétique ou gravitationnel) "se propageant dans le vide" : on ne conserve que les propriétés 2a et 4.

Existe-t-il un phénomène avec les propriétés: 1-3 ?

(Pas 4  $\rightarrow$  pseudoscience).

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 possédant la faculté de raisonner dans des questions philosophiques ne pourra jamais y croire.

ISAAC NEWTON

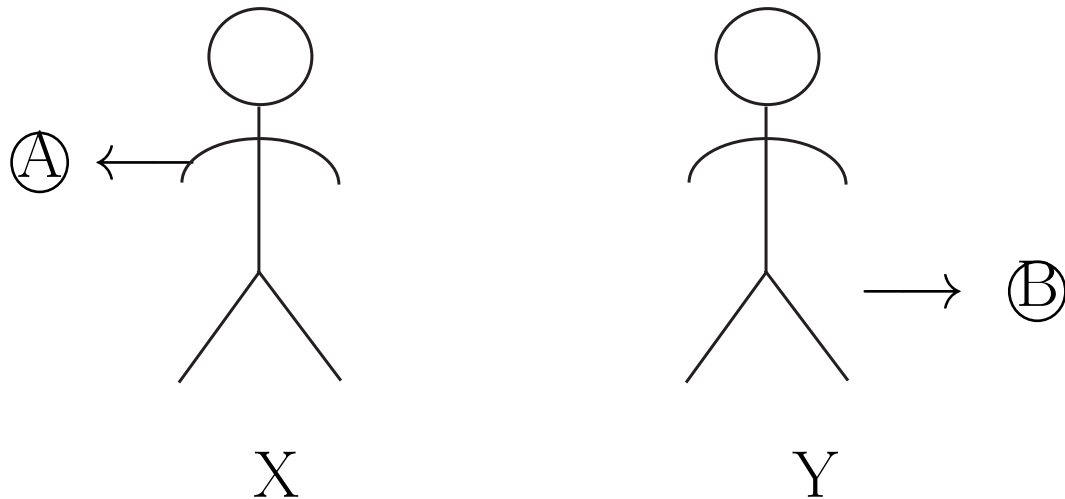
Ce qui existe réellement en un point  $B$  ne devrait pas dépendre du type de mesure qui est faite en un autre point  $A$  de l'espace ; cela devrait également être indépendant du fait que l'on mesure ou non quelque chose en  $A$ .

ALBERT EINSTEIN

Si les résultats d'une expérience sur la chute libre ici à Amsterdam devaient dépendre de façon appréciable de la température au Mont Blanc, de la hauteur de la Seine à Paris, ou de la position des planètes, nous n'irions pas très loin.

H.B.G. CASIMIR

# PREUVE DE L'EXISTENCE DE LA NON LOCALITÉ



Questions            1, 2 ou 3

2 réponses            oui/non

Observation : quand on pose la même question à Alice (A) et Bob (B) on a toujours la même réponse.

Comment expliquer cela?

Pensons aux cas plus simple où la *même* question est posée à chaque fois, et les réponses sont toujours les mêmes des deux côtés (mais varient “aléatoirement” d’une expérience à l’autre).

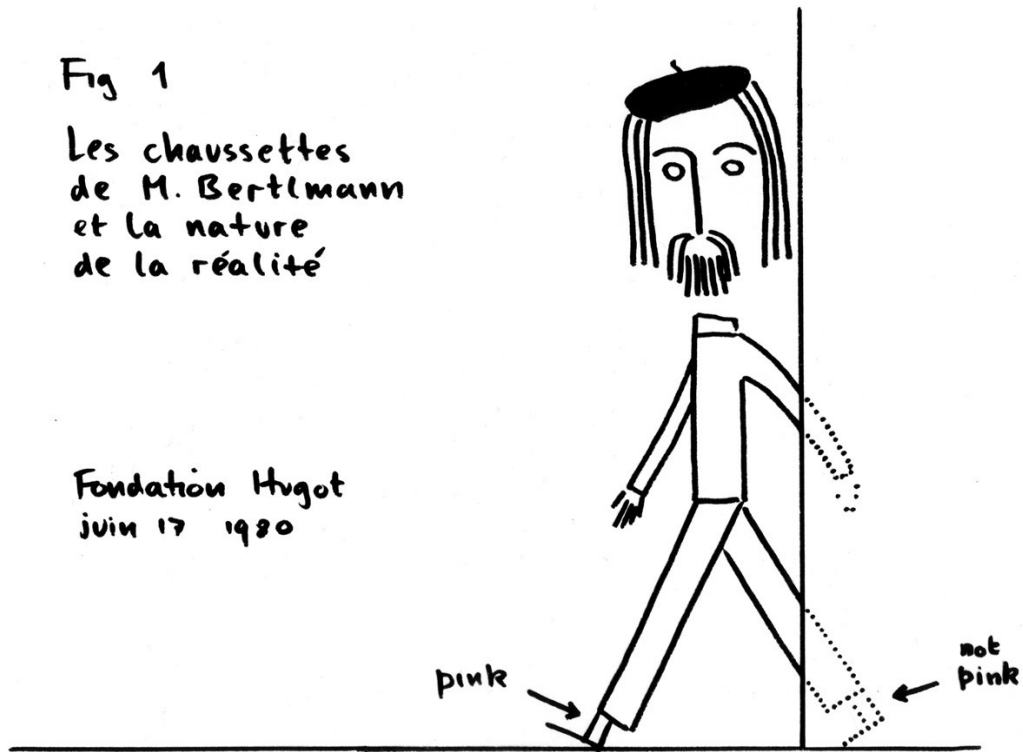
Seule possibilité: les réponses sont prédéterminées *ou* il existe une forme de communication entre  $X$  et  $Y$  *après* que les questions aient été posées !

Autres exemples: casinos, jumeaux, pièces de monnaie.

Fig 1

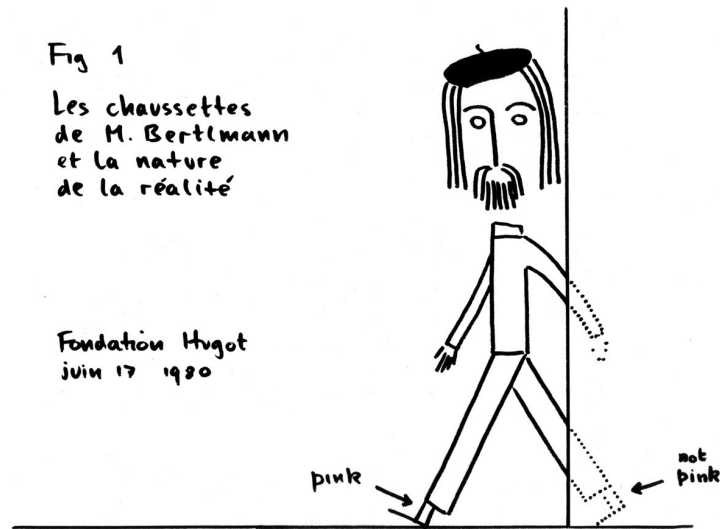
Les chaussettes  
de M. Bertlmann  
et la nature  
de la réalité

Fondation Hugot  
juin 17 1980

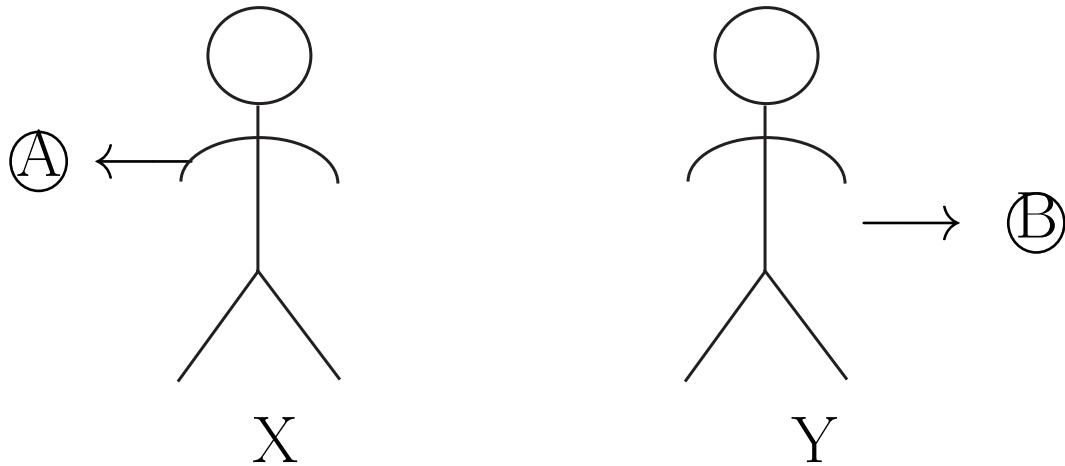


La couleur des chaussettes *existe* indépendamment du fait qu'on les regarde ou non.





Mais que diriez-vous si LA SCIENCE vous affirmait que la couleur des chaussettes *n'existe pas* avant qu'on ne les regarde et que, néanmoins, le fait de regarder une chaussette sur un pied vous permet de connaître *instantanément* la couleur de la chaussette sur l'autre pied ? Et que, de plus, cela restait vrai si les deux chaussettes (qui ne doivent pas être attachées aux pieds) étaient aussi éloignées l'une de l'autre que l'on veut ?



DONC,

X, Y

1, 2, 3

Oui/Non

Très éloignés

3 Questions

2 Réponses

Quand on pose la *même* question (1, 2 ou 3) à Alice (A) et Bob (B)  $\Rightarrow$  on obtient toujours la *même* réponse des deux côtés OUI ou NON.

Corrélation à distance parfaite + **AUCUNE**  
sorte d'action à distance ou "localité"

$\Rightarrow \exists$  des valeurs prédéterminées (aléatoires),  
comme la couleur des chaussettes, qui sont  
des "variables cachées".

$V_X(\alpha), V_Y(\beta), = \text{Oui/Non} \quad \alpha, \beta =$   
1, 2, 3.

avec  $V_X(\alpha) = V_Y(\alpha), \forall \alpha = 1, 2, 3$

Ce qui précède est la partie Einstein Podolsky et Rosen (EPR-1935) de l'argument.

**MAIS**

Cette supposition

**(à elle seule)**

est contredite par des observations faites quand les questions sont différentes.

Partie Bell (1964) de l'argument.

## **PREUVE**

3 Questions      1, 2, 3

2 Réponses      Oui / Non

Si les réponses sont données à l'avance, il existe 8 ( $= 2^3$ ) possibilités pour l'ensemble des réponses aux questions (ou pour l'ensemble des valeurs possibles pour les “variables cachées”):

1	2	3
<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>
<i>O</i>	<i>O</i>	<i>N</i>
<i>O</i>	<i>N</i>	<i>O</i>
<i>O</i>	<i>N</i>	<i>N</i>
<i>N</i>	<i>O</i>	<i>O</i>
<i>N</i>	<i>O</i>	<i>N</i>
<i>N</i>	<i>N</i>	<i>O</i>
<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>

Dans *tous les cas* il existe au moins *deux questions* avec la même réponse.

Donc,

Fréquence (la réponse à 1 = la réponse à 2)  
+ Fréquence (la réponse à 2 = la réponse  
à 3)

+ Fréquence (la réponse à 3 = la réponse  
à 1)  $\geq 1$

MAIS,

dans certaines expériences,

Fréquence (la réponse à 1 = la réponse à 2)  
= Fréquence (la réponse à 2 = la réponse  
à 3)

= Fréquence (la réponse à 3 = la réponse  
à 1)

$$= \frac{1}{4}$$

$$\Rightarrow \frac{3}{4} \geq 1$$

$\Rightarrow$  Contradiction via un théorème sur l'inexistence de "variables cachées" (c'est-à-dire de valeurs prédéterminées).

## **RÉSUMONS L'ARGUMENT**

Corrélations parfaites

+  $\Rightarrow$  valeurs

Localité préexistantes

(Partie EPR de l'argument),

ce qui est un exemple de "variables cachées".

Théorème sur les variables cachées.

$\Rightarrow$  ces valeurs préexistantes n'existent pas  
(partie Bell de l'argument).



En combinant EPR+Bell:

$\Rightarrow$  Non-localité

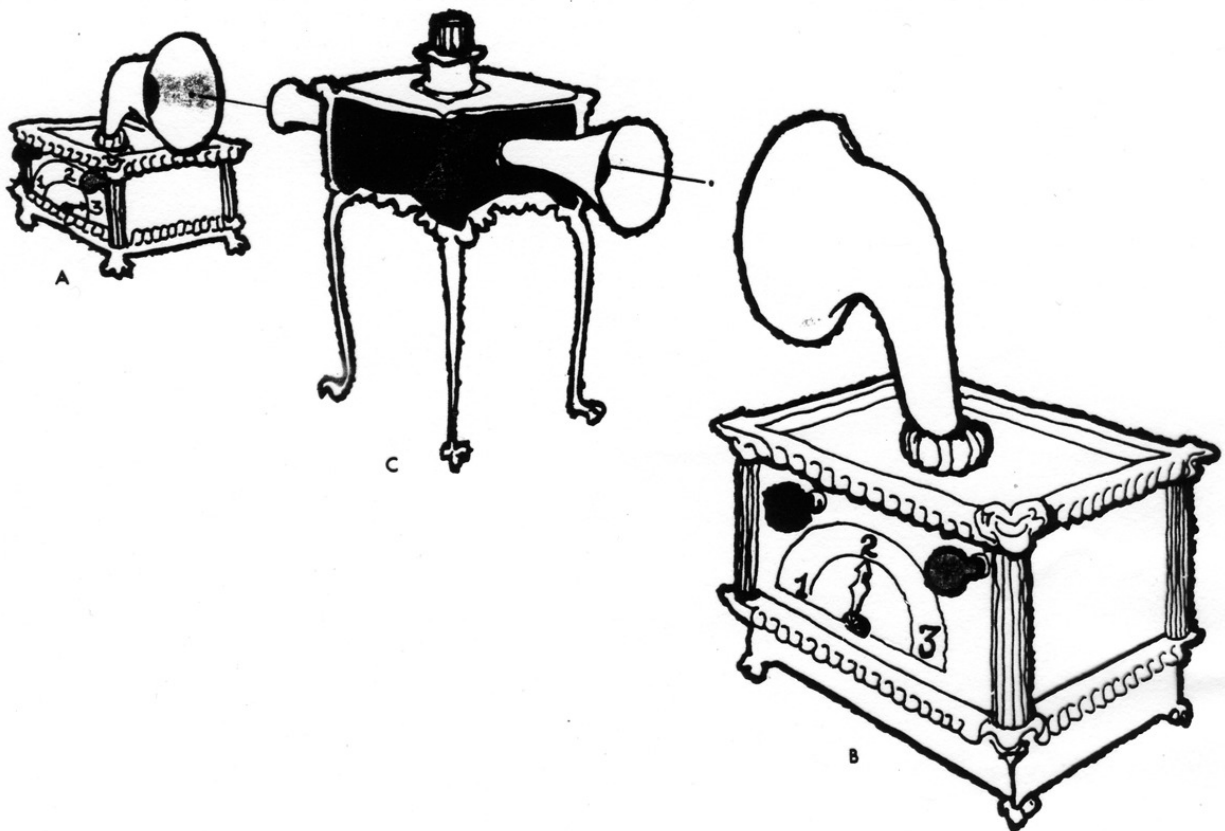
PAS *d'hypothèses* sur le

“déterminisme”

“les variables cachées”

“le réalisme”

# “EXPÉRIENCES”



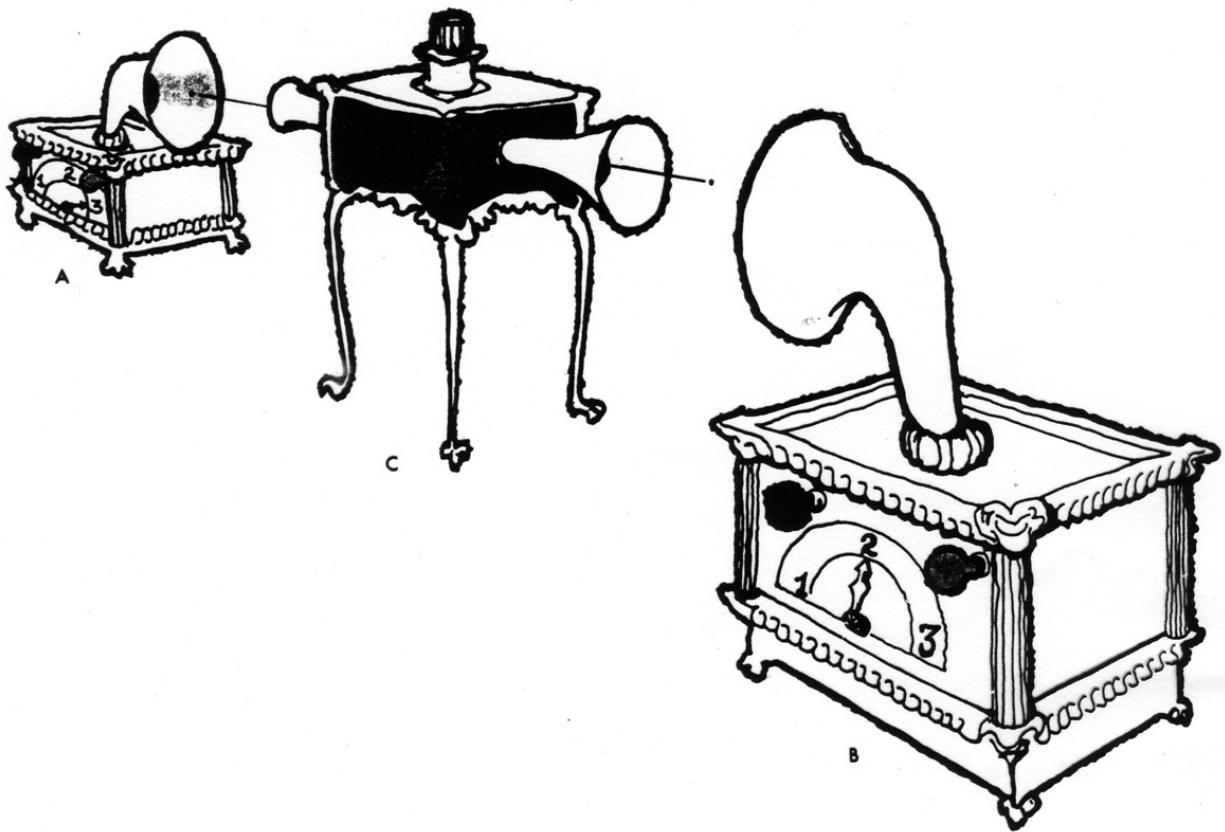
<b>1010</b>	<u>1030</u>	102N
1N3O	2N3O	<b>2N2N</b>
1N2O	3O2N	102N
1O3N	<b>3O3O</b>	<b>1N1N</b>
<b>2O2O</b>	<u>1N2N</u>	1N2O
3N1O	1O2N	1N3O
<b>2N2N</b>	<b>3N3N</b>	<u>1030</u>
1N1N	3O2N	<u>3N2N</u>
1O3N	<u>2O3O</u>	<b>1010</b>
2N1O	3O2N	1N3O
<b>2N2N</b>	<u>3N1N</u>	<b>1010</b>
<u>2O1O</u>	<b>1N1N</b>	1N3O
2N3O	3O2N	1N2O
<b>2O2O</b>	3N1O	<b>3O3O</b>
1O3N	2N1O	<u>3O2O</u>
<b>1N1N</b>	1N2O	3O2N
<u>2N1N</u>	<b>2N2N</b>	<b>1010</b>
<b>3N3N</b>	3N2O	1N3O

$1O3N$  signifie: on mesure dans la direction 1 à gauche et la réponse est “oui”; on mesure dans la direction 3 à droite et la réponse est “non”.

54 résultats, dont 18 (un tiers du total) avec les mêmes questions des deux côtés-en gras. Et 9 questions où les réponses sont les mêmes avec des questions différentes des deux côtés (soulignées), ce qui est un quart du nombre de résultats avec des questions différentes des deux côtés ( $9 = \frac{54-18}{4}$ ).

<b>1010</b>	<u>1030</u>	102N
1N3O	2N3O	<b>2N2N</b>
1N2O	3O2N	102N
1O3N	<b>3O3O</b>	<b>1N1N</b>
<b>2O2O</b>	<u>1N2N</u>	1N2O
3N1O	1O2N	1N3O
<b>2N2N</b>	<b>3N3N</b>	<u>1030</u>
1N1N	3O2N	<u>3N2N</u>
1O3N	<u>2O3O</u>	<b>1010</b>
2N1O	3O2N	1N3O
<b>2N2N</b>	<u>3N1N</u>	<b>1010</b>
<u>2O1O</u>	<b>1N1N</b>	1N3O
2N3O	3O2N	1N2O
<b>2O2O</b>	3N1O	<b>3O3O</b>
1O3N	2N1O	<u>3O2O</u>
<b>1N1N</b>	1N2O	3O2N
<u>2N1N</u>	<b>2N2N</b>	<b>1010</b>
<b>3N3N</b>	3N2O	1N3O

# DESCRIPTION QUANTIQUE



|état des deux particules >

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow 1\rangle |B \downarrow 1\rangle - |A \downarrow 1\rangle |B \uparrow 1\rangle)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow 2\rangle |B \downarrow 2\rangle - |A \downarrow 2\rangle |B \uparrow 2\rangle)$$

On appelle cela un état “intriqué”.

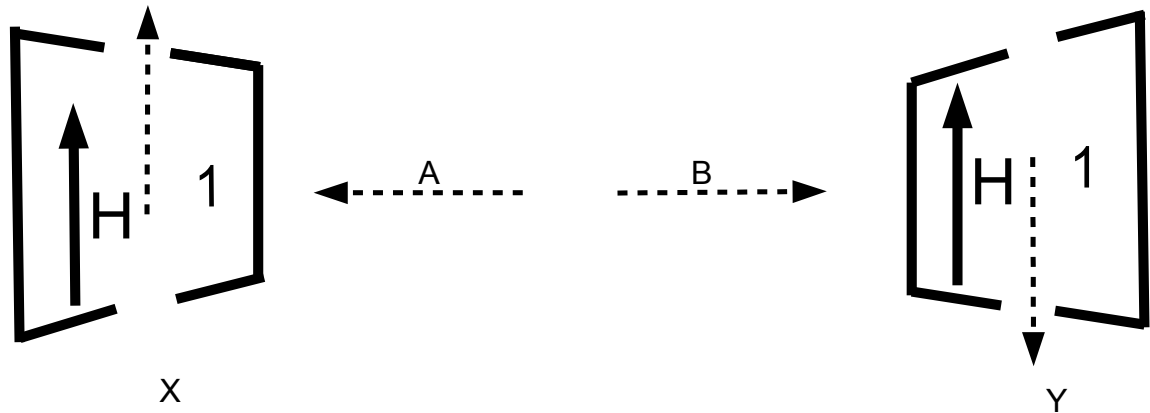
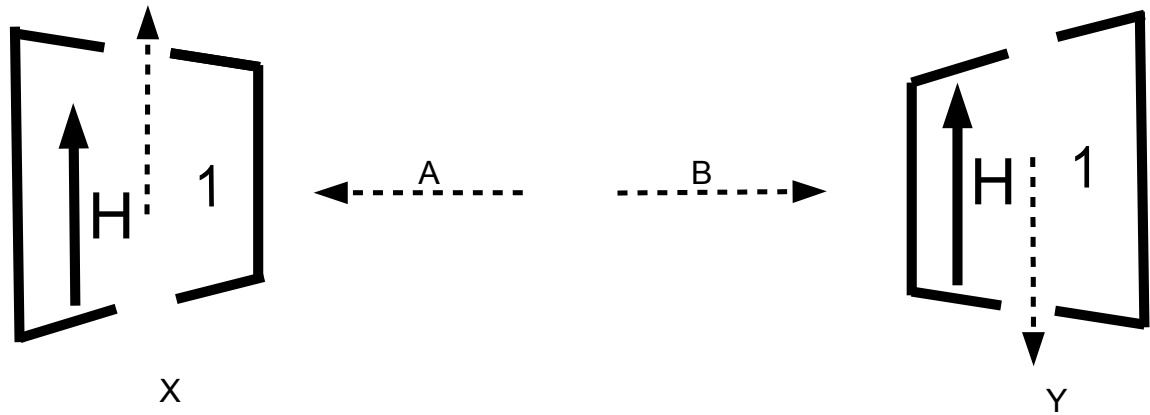


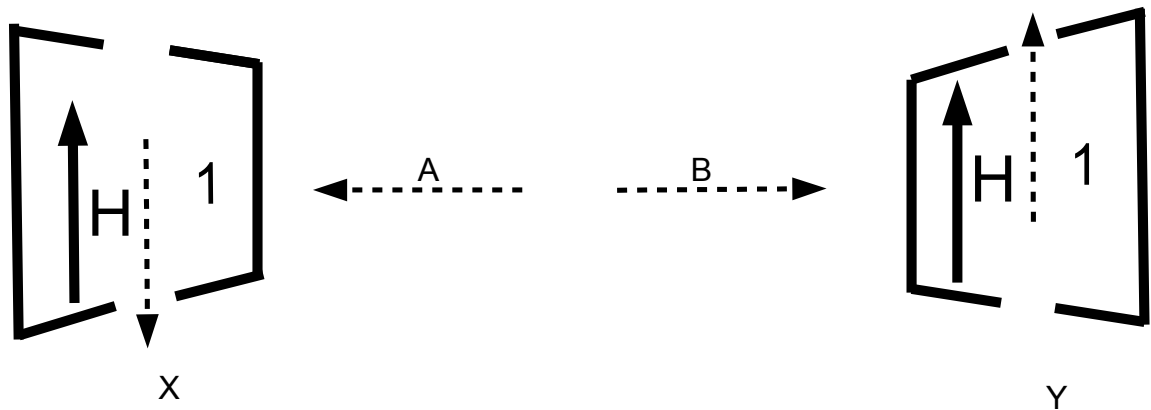
Illustration de ce que signifie cet état intriqué:

On envoie deux particules  $A$  and  $B$ , vers des boîtes situées en  $X$  et  $Y$ , perpendiculaire au plan de l'image dans lesquelles il y a un champ magnétique  $H$  orienté dans la direction verticale, notée 1.





Une possibilité est que la particule *A* aille vers le haut, c'est-à-dire dans la direction du champ, et que la particule *B* aille vers le bas, c'est-à-dire dans la direction opposée à celle du champ.

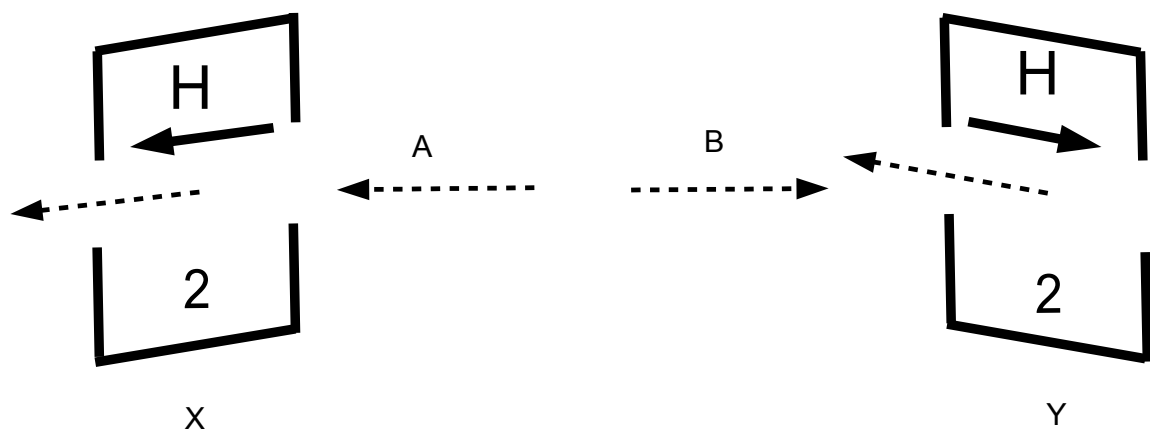


L'autre possibilité est que la particule  $A$  aille vers le bas, c'est-à-dire dans la direction opposée à celle du champ, et que la particule  $B$  aille vers le haut, c'est-à-dire dans la direction du champ.

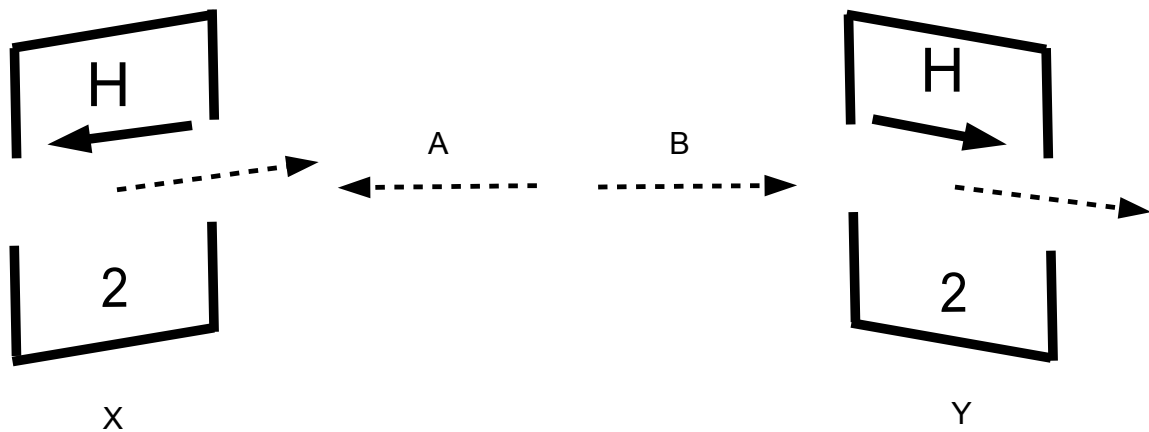
On ne voit **jamais** les deux particules aller dans la direction du champ ou dans la direction opposée à celle du champ.

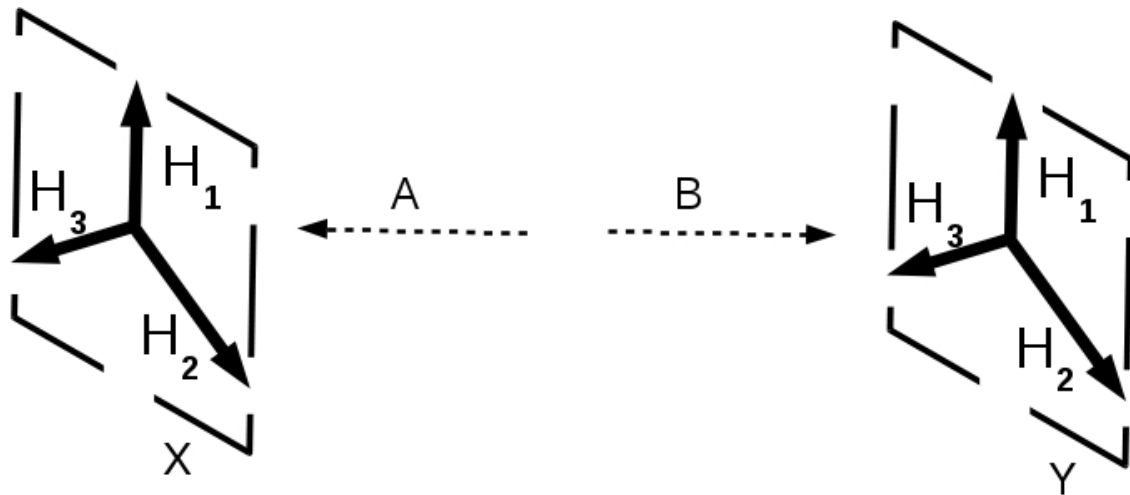
La même chose se passe lorsque le champ est orienté dans la direction horizontale, notée 2.

Une possibilité est que la particule  $A$  aille dans la direction du champ, et que la particule  $B$  aille dans la direction opposée à celle du champ.



L'autre possibilité est que la particule  $A$  aille dans la direction opposée à celle du champ, et que la particule  $B$  aille dans la direction du champ.

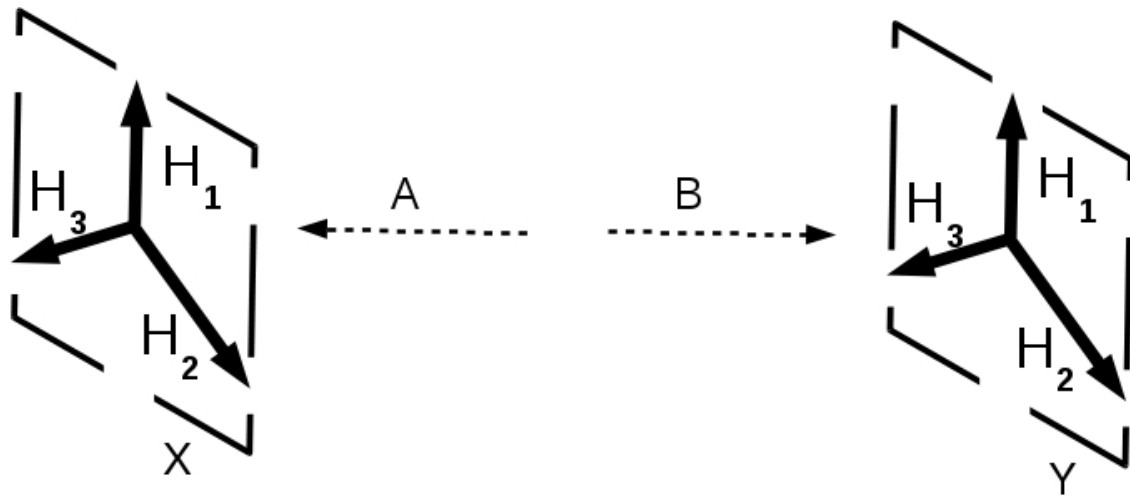




Considérons maintenant trois orientations possibles pour le champ magnétique, dénotées  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ , dans un plan perpendiculaire au mouvement des particules.

On répète l'expérience en choisissant des orientations "au hasard" des deux côtés. Quand les champs sont choisis avec la même orientation, les deux particules vont toujours dans des directions opposées.

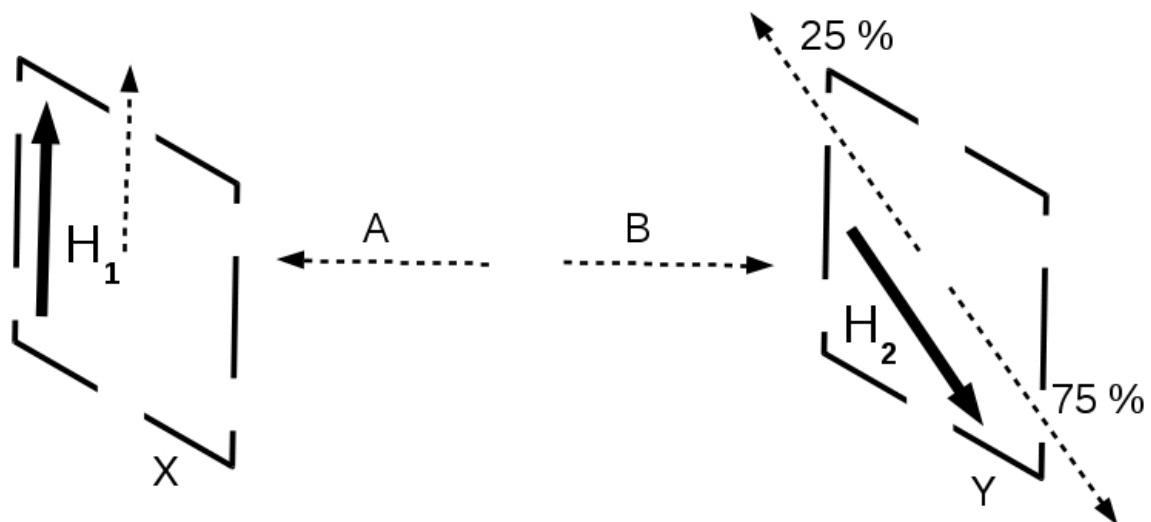
Pour expliciter l'analogie avec notre histoire d'Alice et de Bob, on peut considérer que chaque orientation du champ correspond à une question, 1, 2, 3 et que la direction prise par la particule correspond à une réponse OUI/NON.



Comme les directions prises par les particules sont anti-corrélées (les directions sont toujours opposées) il faut faire une convention du type:

Si la particule va dans la direction du champ à gauche, la réponse là est OUI, et si elle va dans la direction du champ à droite, la réponse là est NON (et vice-versa).

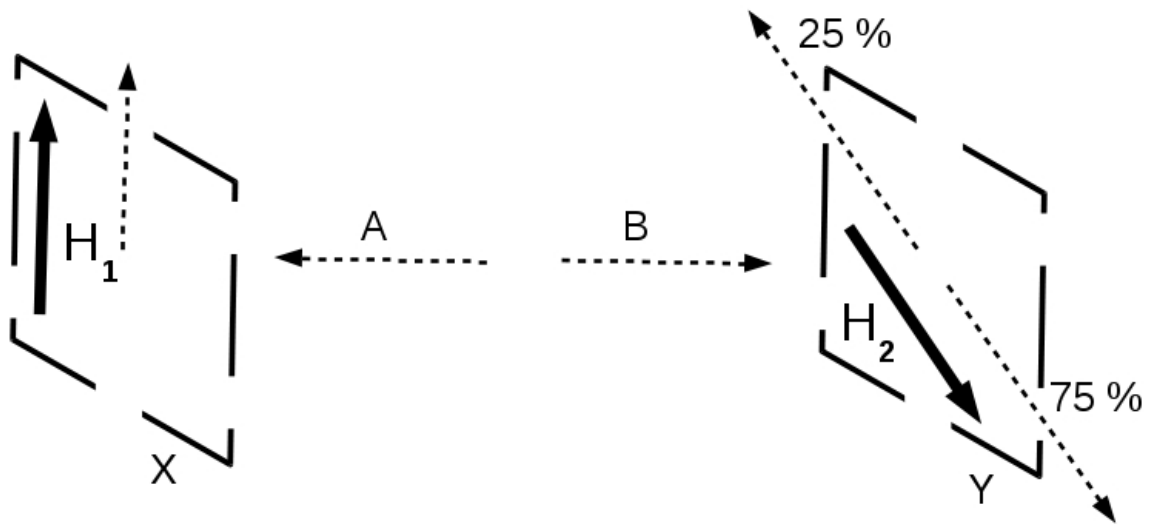
Ainsi, on obtient *toujours* les mêmes réponses des deux côtés.



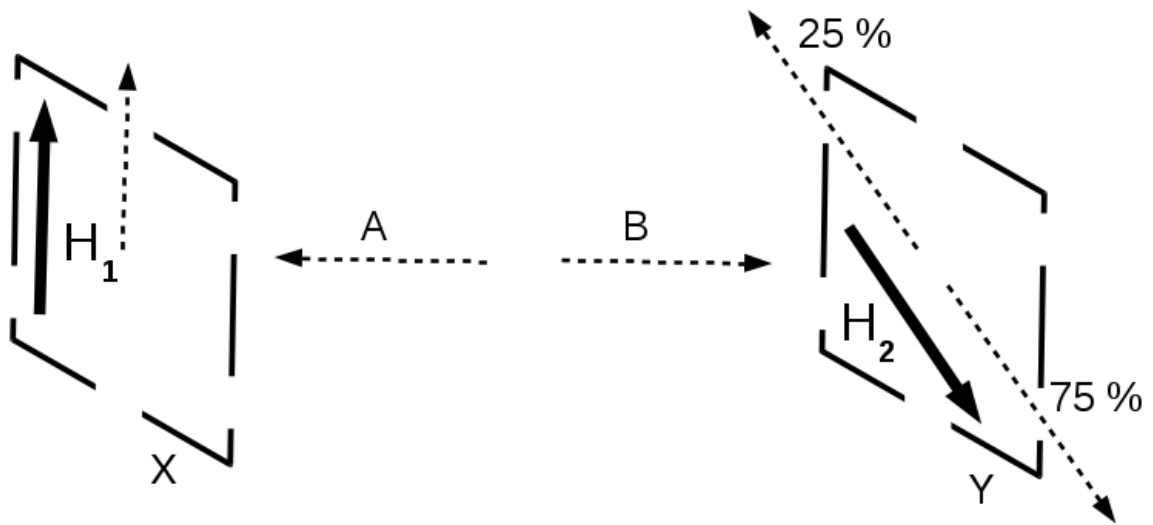
Ici on choisit la direction 1 en  $X$  et la direction 2 en  $Y$ . Si la particule  $A$  va dans la direction du champ, comme dans la figure, la particule  $B$  ira dans la direction du champ dans 75% dans des cas et dans la direction opposée à celle du champ dans 25% des cas (et vice-versa).

On obtient les mêmes résultats avec les 5 autres choix de paires d'orientations différentes du champ en  $X$  et  $Y$ .





Comme les résultats sont anti-corrélés (pour une même orientation du champ des deux côtés), le fait que les directions de la particule A et de la particule B ne sont opposées que dans 25% des cas, signifie que les réponses ne sont les mêmes que dans un quart des cas, ce qui explique le facteur  $1/4$  utilisé dans l'argument de Bell:



Fréquence (la réponse à 1 = la réponse à 2)  
 =Fréquence (la réponse à 2 = la réponse à  
 3)=  
 =Fréquence (la réponse à 3 = la réponse à  
 1)  
 =  $\frac{1}{4}$

Revenons au formalisme quantique:

$$\begin{aligned} & \text{|\acute{e}tat des deux particules } > \\ & = \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \ 1\uparrow\rangle |B \ 1\downarrow\rangle - |A \ 1\downarrow\rangle |B \ 1\uparrow\rangle) \\ & = \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \ 2\uparrow\rangle |B \ 2\downarrow\rangle - |A \ 2\downarrow\rangle |B \ 2\uparrow\rangle) \\ & = \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \ 3\uparrow\rangle |B \ 3\downarrow\rangle - |A \ 3\downarrow\rangle |B \ 3\uparrow\rangle) \end{aligned}$$

Si on “mesure” le spin dans la direction 1 en  $A$  et qu’on voit  $\uparrow$ , l’\acute{e}tat devient  $\Rightarrow |A \ 1\uparrow\rangle |B \ 1\downarrow\rangle$ .

Si on voit  $\downarrow$ , l’\acute{e}tat devient  $\Rightarrow |A \ 1\downarrow\rangle |B \ 1\uparrow\rangle$ .

Idem si on “mesure” le spin dans la direction 2 ou 3 (r\^eduction de l’\acute{e}tat lors d’une mesure).

Mais alors on a chang\^e aussi *non localement* l’\acute{e}tat en  $B$ .

Reposons la question posée à propos des boîtes:

| état  $\rangle$  = physique ou épistémique ?

Si physique  $\longrightarrow$  non localité

Si épistémique  $\longrightarrow$  MQ = incomplète, c'est-à-dire qu'il existe des "variables cachées", qui complèteraient la description quantique et qui, ici, détermineraient *si la particule en B est*  $1\uparrow$  ou  $1\downarrow$ ,  $2\uparrow$  ou  $2\downarrow$ ,  $3\uparrow$  ou  $3\downarrow$ .

MAIS, ce que montre Bell, c'est que la simple supposition de l'existence de ces propriétés mène à une contradiction.

Laissez moi résumer une fois de plus le raisonnement qui a mené à l'impasse. Les corrélations EPRB sont telles que le résultat de l'expérience d'un côté prédit immédiatement celui de l'autre côté, quand les analyseurs sont parallèles.

Si nous n'acceptons pas l'idée selon laquelle l'intervention d'un côté a un effet causal sur l'autre, nous sommes, semble-t-il, obligés d'admettre que les résultats des deux côtés sont de toute façon déterminés à l'avance, indépendamment de l'intervention d'un côté, par des signaux venant de la source et par les dispositions locales des aimants. Mais cela a des conséquences sur des dispositifs non-parallèles qui sont en conflits avec la mécanique quantique. Donc, on *ne peut pas* nier que l'intervention d'un côté a une influence causale sur l'autre côté.

J. BELL

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 leurs comportements.

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 cachèrent 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 ne marche tout simplement pas.

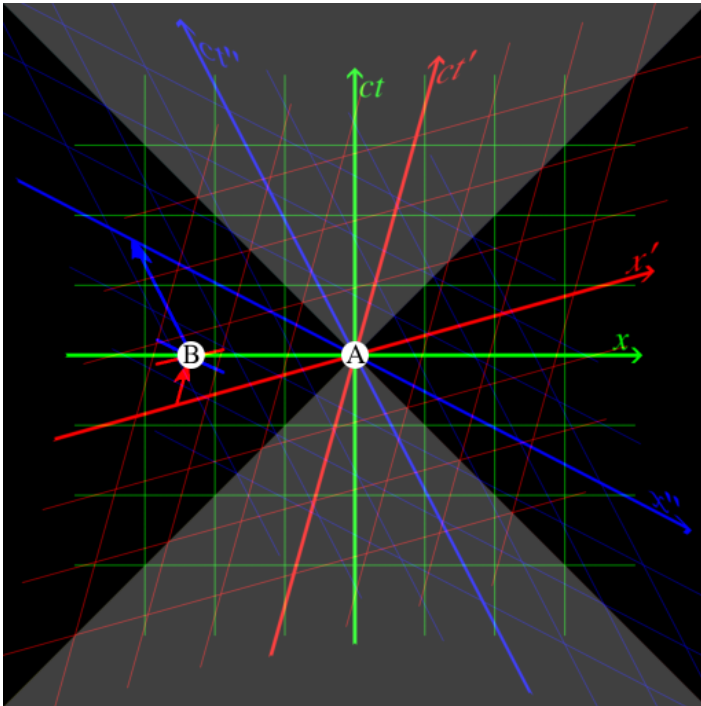
J. BELL



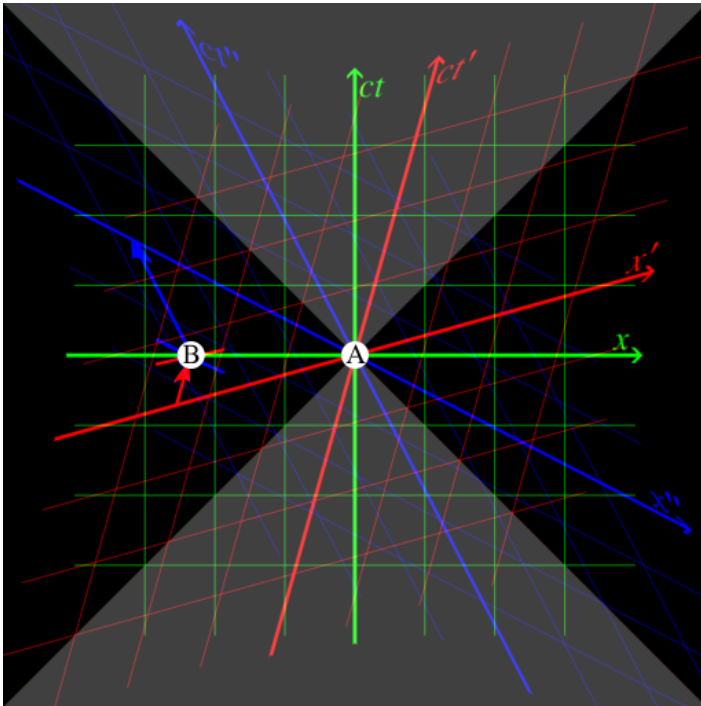
## **Problème avec la relativité**

Si on peut envoyer des messages instantanément, alors, la relativité implique qu'on peut en envoyer dans son propre passé.

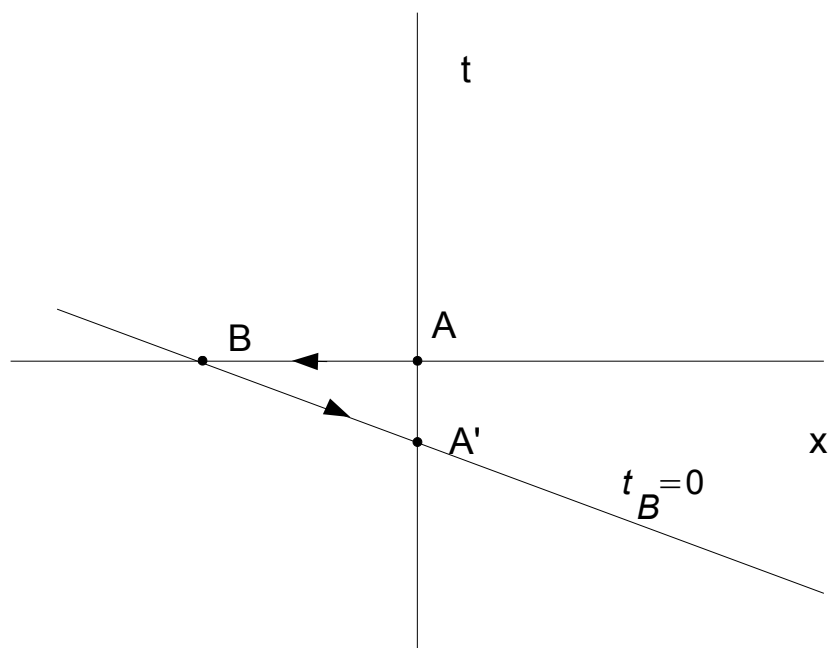
**À cause de la relativité de la simultanéité**



On considère trois référentiels en mouvement relatifs les uns par rapport aux autres; les lignes vertes, bleues et rouges indiquent les événements simultanés par rapport à chacun de ces référentiels. L'axe  $x$  correspond à tous les événements simultanés avec A relativement au référentiel indiqué en vert. L'axe  $x'$  correspond à tous les événements simultanés avec A relativement au référentiel indiqué en rouge. L'axe  $x''$  correspond à tous les événements simultanés avec A relativement au référentiel indiqué en bleu.

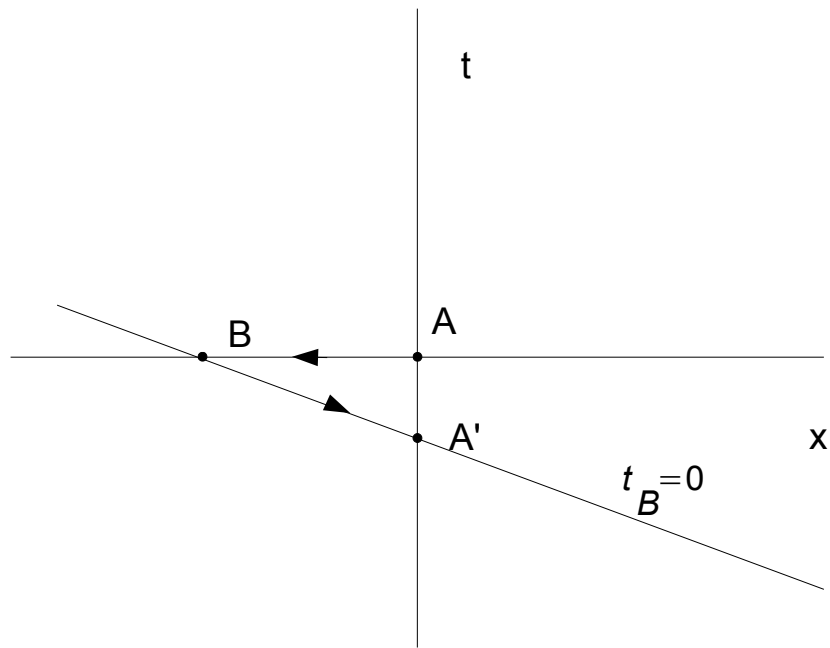


L'événement B est simultané avec A relativement au référentiel indiqué en vert, mais se produit avant A relativement au référentiel indiqué en bleu et se produit après A relativement au référentiel indiqué en rouge.



L'axe des  $x$  représente l'axe  $t = 0$  dans un référentiel où  $A$  est au repos. Supposons que l'on puisse envoyer un message instantanément de  $A$  à  $B$  ( $B$  est dans le présent de  $A$ ).

Mais, si en  $B$  on a référentiel en mouvement par rapport à celui où  $A$  est au repos, alors le présent dans ce référentiel peut être représenté par la droite  $t_B = 0$ .



Si on peut envoyer un message instantanément de  $A$  à  $B$ , alors  $B$  peut en envoyer un à  $A'$ , qui est dans le passé de  $A$ .

Revenons au formalisme quantique:

|état des deux particules >

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow\rangle |B \downarrow\rangle - |A \downarrow\rangle |B \uparrow\rangle)$$

Si on “mesure” le spin dans la direction 1 en  $A$ , avant de le mesurer en  $B$ , et qu’on voit  $\uparrow$ , l’état devient  $\Rightarrow |A \uparrow\rangle |B \downarrow\rangle$ .

Si on voit  $\downarrow$ , l’état devient  $\Rightarrow |A \downarrow\rangle |B \uparrow\rangle$ .

On change ainsi *instantanément* l’état en  $B$ .

Mais si on mesurait le spin dans la direction 1 en  $B$ , avant de le mesurer en  $A$ , on changerait *instantanément* l’état en  $A$ .

*Mais qui mesure avant l’autre dépend du référentiel !!!*

La seule solution serait de considérer la réduction comme “épistémique”, c’est-à-dire n’impliquant aucune action réelle et révélant simplement des valeurs pré-existantes du spin.

Mais Bell a montré que cette “solution” implique une contradiction ( $\frac{3}{4} \geq 1$ ).

Donc, il y a bien là une action à distance.

Mais alors la relativité implique l’existence d’une action sur le passé, dans certains référentiels.

**Toute notre notion intuitive de causalité s'effondre, parce qu'elle suppose que les causes précèdent leurs effets dans tous les référentiels.**

Si la réduction de l'état est physique, alors qui d'Alice ou de Bob réduit l'état de l'autre en premier dépend du référentiel.

À moins d'introduire un référentiel privilégié dans lequel la "vraie" causalité a lieu et où les causes précèdent leurs effets.

Le moins que l'on puisse dire, c'est que cela contredit l'esprit de la relativité.



**Il n'existe aucune solution satisfaisante.**

Quid de la théorie quantique des champs ou de la mécanique quantique relativiste ?

On n'y parle jamais de la réduction de l'état de façon relativiste  $\longrightarrow$  la question posée par EPR et Bell n'y est même pas discutée.

**Mais, heureusement, la non-localité ne permet pas d'envoyer de messages!**

En effet, dans la situation EPR-Bell:

- Chaque côté observe une suite parfaitement aléatoire de réponses Oui/Non, qui sont incontrôlables par Alice ou Bob.
- Donc, aucun message ne peut être transmis entre Alice et Bob

**Par conséquent, la non-localité ne justifie pas les superstitions (télépathie par exemple)**

MAIS si Alice et Bob disent à l'autre l'expérience qu'elle ou il a faite (1, 2 ou 3),

ou, plus simplement, s'ils font tout le temps la même expérience,

alors ils savent tous les deux quel résultat a été obtenu de l'autre côté quand la même expérience a été faite des deux côtés.

⇒ Elles ont alors une suite commune de réponses Oui et Non, c'est-à-dire qu'une certaine information a bien été transmise plus vite que la lumière.

C'est la base de la cryptographie quantique.

S'il existe une action à distance instantanée, alors pour "sauver" la causalité, il faut introduire un référentiel privilégié!

Mais l'argument montrant que l'on ne peut pas envoyer de messages montre aussi qu'on ne peut pas détecter ce référentiel.

## Que penser de ce problème?

C'est d'une drôle de façon que Dieu a fait le monde. En cachant son échafaudage, en quelque sorte ... C'est incroyable. Mais je veux insister sur le fait que cette difficulté n'est pas celle que vous trouvez dans la plupart des livres qui disent "Regardez comme la mécanique quantique est bizarre".

J.S. BELL

## REACTIONS

Le théorème de Bell est la plus profonde découverte de la science

H. STAPP

La seule partie de cet article [celui d'EPR] qui survivra, je pense, est une phrase ...

A. PAIS

Quiconque n'est pas préoccupé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête

ANONYME

... un travail théorique de John Bell a montré que le dispositif expérimental de EPRB pouvait être utilisé pour distinguer la mécanique quantique de théories hypothétiques de variables cachées. ... Après la publication du travail de Bell, plusieurs équipes de physiciens expérimentateurs ont réalisé l'expérience EPRB. Le résultat fut attendu avec impatience, bien que presque tous les physiciens pariaient sur le caractère correct de la mécanique quantique, qui a été, en fait, justifiée par les résultats.

M. GELL-MANN

La vue d'Einstein était ce que nous appellerions aujourd'hui une théorie de variables cachées.[...] Ces théories forment la base de l'image mentale de l'univers qui est celle de nombreux scientifiques et de presque tous les philosophes des sciences. Mais ces théories de variables cachées sont fausses. Le physicien britannique, John Bell, qui est mort récemment, a inventé une expérience qui pourrait tester ces théories de variables cachées. Quand l'expérience fut faite soigneusement, les résultats furent en contradiction avec les théories de variables cachées.

S. HAWKING



OUI-à condition d'oublier la partie EPR de  
l'argument!

À mon avis, l'argument le plus convaincant  
contre la théorie des variables cachées a été  
présenté par J. S. Bell.

E. WIGNER

IDEM!

## RETOUR SUR L'HISTOIRE-AVANT BELL, APRÈS EPR

### QUE PENSAIT VRAIMENT EINSTEIN?

Si on se demande, indépendamment de la mécanique quantique, ce qui est caractéristique du monde des idées en physique, on est frappé de prime abord par ceci: les concepts de la physique se réfèrent à un monde extérieur réel . . . Il est, de plus, caractéristique que ces objets physiques sont pensés comme étant disposés dans un continuum d'espace-temps. Un aspect essentiel de cette disposition des choses en physique est qu'elles prétendent avoir, à un instant donné, une existence indépendante les unes des autres, pourvu que ces objets soient "situés dans des parties différentes de l'espace".

L'idée suivante caractérise l'indépendance relative des objets éloignés dans l'espace (A et B): l'influence externe sur A n'a aucune influence sur B . . .

Je ne doute pas du fait que les physiciens qui considèrent les méthodes descriptives de la mécanique quantique comme en principe définitives réagiraient ainsi à cette façon de penser: ils abandonneraient l'exigence . . . d'une existence indépendante pour la réalité physique présente dans différentes parties de l'espace; et ils auraient raison de faire remarquer que nulle part la mécanique quantique ne requiert explicitement ce fait.

J'admets cela, mais je soulignerais ceci: quand je considère les phénomènes physiques qui me sont connus et particulièrement ceux qui sont incorporés avec succès dans la mécanique quantique, je ne trouve nulle part de fait qui rendrait plausible l'abandon de cette exigence.

Je suis par conséquent enclin à croire que la description de la mécanique quantique . . . doit être vue comme une description incomplète et indirecte de la réalité, qui devra être remplacée à une époque future par une description plus complète et plus directe.

A. EINSTEIN (1948)

## L'INCOMPRÉHENSION DE M. BORN

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.

M. BORN

## COMMENTÉE PAR J. BELL

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.

Ces références à Born n'ont pas pour but de diminuer une des figures majeures de la physique moderne. Elles veulent illustrer la difficulté qu'il y a à mettre de côté ses préjugés et à écouter ce qui est réellement dit. Et à vous encourager, *vous* chers auditeurs, à écouter un peu mieux.

## LA RÉPONSE DE BOHR À EPR

“Si, sans perturber d’aucune façon un système, on peut prédire avec certitude la valeur d’une quantité physique, alors il existe un élément de la réalité physique qui correspond à cette quantité physique” (EPR).



L'énoncé du critère ci-dessus ... contient une ambiguïté en ce qui concerne l'expression "sans perturber d'aucune façon un système". Bien sûr, dans le cas considéré, il n'est pas question d'une perturbation mécanique du système analysé durant la dernière étape critique du processus de mesure. Mais, même à cette étape, il y a essentiellement la question de *l'influence sur les conditions mêmes qui définissent les types possibles de prédictions concernant le comportement futur du système* ... leur argumentation ne justifie pas leur conclusion selon laquelle la description quantique est essentiellement incomplète

... Cette description peut être caractérisée comme l'utilisation rationnelle de toutes les possibilités d'une interprétation non-ambigüe des mesures, compatible avec l'interaction finie et non contrôlable entre les objets et les instruments de mesure dans le champ de la théorie quantique.

N. BOHR

Est-ce que:

“La position de Bohr triomphe sur toute la  
ligne”

I. STENGERS

Pas si vite!

# LA RÉPONSE DE BOHR COMMENTÉE

## PAR J. BELL

Je ne comprends que très peu ce que cela veut dire. Je ne comprends pas en quel sens le mot “mécanique” est utilisé, pour caractériser les perturbations que Bohr n’envisage pas, par opposition à celles qu’il envisage. Je ne comprends pas ce que le passage en italique signifie “ l’influence sur les conditions mêmes qui définissent les types possibles de prédictions concernant le comportement futur du système”.

Est-ce que cela veut dire simplement que différentes expériences faites sur le premier système donnent différentes sortes d'information sur le second ? Mais c'était justement un des principaux arguments d'EPR . . .

De plus, je ne comprends pas la référence finale à “l’interaction finie et non contrôlable entre les objets et les instruments de mesure”, qui semble justement ignorer le point essentiel de EPR, à savoir que, en l’absence d’action à distance, seul le premier système peut supposément être affecté par la première mesure, et néanmoins des prédictions bien définies deviennent possibles pour le second système. Est-ce que Bohr rejette simplement la prémisse – pas “d’action à distance” – plutôt que de réfuter l’argument ?

J. S. BELL

Les physiciens contemporains sont divisés en deux classes. Ceux de type 1 sont préoccupés par EPR et Bell. Ceux de type 2 (la majorité), ne le sont pas, mais on doit distinguer deux sous-classes; Ceux de types 2a expliquent pourquoi cela ne les préoccupe pas. Leurs explications tendent soit à être complètement à côté de la question (comme Born répondant à Einstein) ou à se baser sur des assertions dont on peut montrer qu'elles sont fausses. Ceux de type 2b ne sont pas préoccupés et refusent de dire pourquoi. Leur position est inattaquable. (Il existe une variante du type 2b qui disent que Bohr a arrangé tout cela, mais refusent d'expliquer comment).

D. MERMIN

Je sais que la plupart des hommes, même ceux qui sont à l'aise avec les problèmes de la plus haute complexité, peuvent rarement accepter les plus simples et les plus évidentes des vérités, si les accepter les forcerait à admettre la fausseté de conclusions qu'il se sont plus à expliquer à des collègues, qu'ils ont fièrement enseignées à d'autres et qu'il ont insérées, fil après fil, dans le tissu de leur vie.

TOLSTOY