

# Le petit atelier de mécanique quantique

**32 expériences illustrées à faire chez soi**

Notions abordées: particules, quantum, indétermination, variables cachées, superposition d'états, fonction d'onde, localité, intrication, décohérence, téléportation, cryptographie quantique, intrication double, paradoxe E.P.R., inégalités de Bell, dualité onde-corpuscule.

**Blaise Muller**

## Prologue

La physique est avant tout une science de l'observation et de la pratique. Les modèles qu'elle élabore n'ont pas nécessairement pour priorité de décrire la réalité du comportement intime de la matière, mais de prévoir le résultat de telle ou telle expérience.

Dans le monde scientifique, il est normal que des expériences de plus en plus pointues montrent des résultats qui diffèrent de ceux qui sont prédits par les modèles des théoriciens. Il faut donc tout naturellement constamment affiner, compléter, ou même remplacer ces modèles. Nos représentations du temps et de l'espace ont été radicalement modifiées. Dans la plupart des cas pourtant, notre pensée a su intégrer ces nouvelles notions à celles qui préexistaient, en les enrichissant. Une exception notable subsiste: la physique quantique reste pour beaucoup un défi à l'imagination. Les mécanismes à l'œuvre dans les phénomènes quantiques ont été si souvent appelés "surprenants", "paradoxaux" ou "étranges" que certains penseurs extrémistes n'hésitent pas à nous y faire voir des éléments paranormaux!

Les exercices de cet ouvrage se proposent de vous familiariser avec quelques mécanismes, tout en gardant les pieds sur terre.

Je rassure les physiciens: mon but n'est pas de fonder une nouvelle chapelle, ni de remettre en question leurs enseignements, ni même de défendre telle ou telle "interprétation". J'espère simplement que le fait de toucher du doigt des concepts qui dépassent un peu l'expérience quotidienne peut diminuer la peur qu'inspire généralement la mécanique quantique et, pour certains, la science en général.

J'ai d'autant moins l'ambition de faire ici œuvre de savant que je ne suis pas du tout "dans la branche". Je ne suis qu'un amateur que la physique a toujours passionné et mon laboratoire personnel n'héberge que du petit matériel d'électronique.

J'ai seulement essayé d'illustrer par des manipulations faciles à reproduire quelques mécanismes souvent décrits dans la littérature sérieuse. Et parce que c'est concret, c'est quelquefois inévitablement rudimentaire.

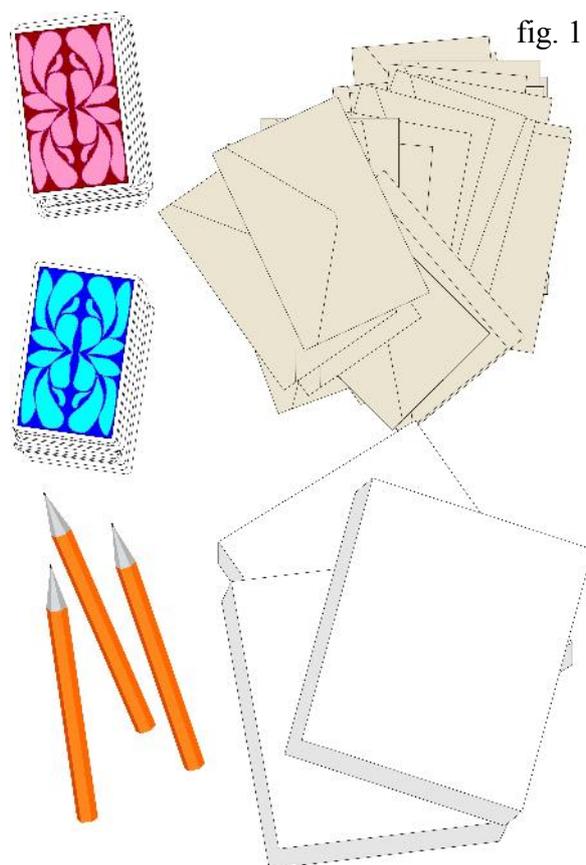
## Table des matières

<b>Notre dispositif expérimental</b>		<b>4</b>	
<b>Chapitre 1</b>	<b>Particules isolées</b>	<b>5</b>	
Expérience 1	Création d'une particule	6	
Expérience 2	Notre première mesure	8	
Expérience 3	État quantique	9	
Expérience 4	Valeurs possibles et valeurs moyennes	11	
Expérience 5	Fonction d'onde		12
Expérience 6	Corpuscule ou onde	15	
Expérience 7	Action à distance	19	
<b>Chapitre 2</b>	<b>Particules intriquées</b>	<b>22</b>	
Expérience 8	Création d'une paire intriquée	22	
Expérience 9	Localité et réalisme	24	
Expérience 10	Création d'une particule "nette"	26	
Expérience 11	Téléportation	27	
Expérience 12	Répétiteur	29	
Expérience 13	Paires intriquées sans variables cachées	32	
Expérience 14	Cryptographie quantique	33	
Expérience 15	Cohérence et décohérence	35	
<b>Chapitre 3</b>	<b>La double intrication</b>	<b>36</b>	
Expérience 16	Création de paires à intrication double	36	
Expérience 17	On ne mesure qu'une fois	38	
Expérience 18	Le paradoxe E.P.R.	40	
Expérience 19	Relations d'incertitude	42	
Expérience 20	Cryptographie quantique sécurisée	44	
<b>Chapitre 4</b>	<b>Particules floues et particules nettes</b>	<b>47</b>	
Expérience 21	Particules floues et particules nettes	48	
Expérience 22	Influence de la mesure	51	
Expérience 23	Remonter le temps ?	55	
	<b>Expériences complémentaires</b>	<b>58</b>	
<b>Chapitre 5</b>	<b>Les inégalités de Bell</b>	<b>59</b>	
Expérience 24	Particules polarisées	60	
Expérience 25	Mesure des coïncidences	63	
Expérience 26	Polarisations corrélées	65	
Expérience 27	Les angles de Bell	67	
Expérience 28	L'expérience complète	70	
<b>Chapitre 6</b>	<b>L'interféromètre de Mach-Zehnder</b>	<b>73</b>	
Expérience 29	Un miroir semi-réfléchissant	74	
Expérience 30	L'interféromètre asymétrique - onde ou corpuscule	76	
Expérience 31	L'interféromètre symétrique - onde et corpuscule	78	
Expérience 32	L'interféromètre symétrique - influence de la mesure	80	
<b>Conclusion</b>		<b>81</b>	

## Notre dispositif expérimental

### Matériel (fig. 1)

- Deux jeux de cartes de type "bridge" (2 dos différents), et comportant chacun 54 cartes (52 cartes ordinaires et 2 jokers).
- Trois blocs de papier et trois crayons pour noter des résultats.
- Quelques dizaines d'enveloppes à rabat (dans l'idéal: au moins 108), assez grandes pour qu'on puisse y ranger une carte et assez opaques pour qu'on ne puisse pas détecter la nature de la carte qui s'y trouve.



### Manipulateurs

3 expérimentateurs. Pour rester fidèles à une tradition bien implantée dans les milieux de la mécanique quantique, nous les appellerons Alice, Bob et Charlie.

Comme le sous-titre de l'ouvrage l'indique, nous présentons des expériences à faire chez soi. Mettez la main à la pâte et ne vous contentez pas de lire les descriptions des expériences!

Même si un manipulateur seul peut réaliser les expériences proposées, l'intervention de trois personnes permet une plus grande rigueur scientifique<sup>1</sup>.

Les expériences proposées ici s'inscrivent dans le cadre d'un **modèle**. Le propos est d'illustrer quelques comportements des particules quantiques et de conduire le lecteur ou la lectrice à un mode de pensée compatible avec les conceptions actuelles de la mécanique quantique.

Il faudra garder à l'esprit que, même si les expériences représentent des manipulations de particules élémentaires, nous n'agissons en réalité que sur les objets macroscopiques de notre matériel.

Ce qui signifie qu'il est impossible que nos expériences aient automatiquement un rapport direct avec ce qui se passe dans les laboratoires qui manipulent de "vraies" particules.

Le modèle est toutefois assez solide pour représenter correctement le comportement des "vraies" particules, dans la limite des expériences proposées ici. Plus exactement: notre modèle ne simule pas le **comportement des particules**, il ne simule que le déroulement des expériences et leurs résultats<sup>2</sup>.

Certaines expériences ne sont pas à la portée de notre modèle, notamment celles qui impliquent un très grand nombre de particules.

En revanche, certaines expériences faciles à réaliser avec notre modèle ne sont pas loin de dépasser les capacités des laboratoires actuels; par exemple quand il s'agit de conserver des particules dans le même état sur une longue durée ou d'empêcher que des particules se mélangent.

1 Si on envisage des démonstrations publiques, l'un de nos manipulateurs peut fonctionner comme présentateur. Le matériel aura éventuellement besoin d'être adapté.

2 L'attitude face au modèle (le modèle en général, pas le nôtre ici en particulier) divise les savants dès la fondation de la mécanique quantique. D'un côté ceux qui, comme Einstein, exigent que la physique soit d'abord la représentation de la réalité et pour qui les apparentes bizarreries de la mécanique quantique sont dues au fait que la théorie n'est pas complète. De l'autre ceux qui, constatant l'indéniable justesse des résultats prédits par la mécanique quantique, considèrent que nous devons accepter que la réalité comporte des aspects contraires à nos intuitions, même si ça dérange. On prête au grand physicien Richard Feynman (1918-1988) la directive "Tais-toi et calcule!", que la plupart des ingénieurs actuels suivent en toute confiance.

# Chapitre 1

## Particules isolées

Dans cet ouvrage, nous n'aborderons qu'un seul sujet: les **particules quantiques**. Nous découvrirons par nos propres expériences leur naissance et leur disparition, leurs trajectoires, leurs interactions entre elles et avec le monde qui les entoure et quelques-unes de leurs plus étonnantes propriétés.

Cet ouvrage n'abordera aucun des domaines pourtant très concernés par la physique quantique que sont la thermodynamique, l'électronique ou l'astrophysique. Au plus, nous nous permettrons quelques incursions dans le domaine de la cryptographie quantique.

Que ce soit dans les laboratoires ou ici dans nos expériences, tout travail sur les particules est soumis à deux contraintes absolues:

1) Une particule élémentaire, par définition, ne peut pas être subdivisée.

2) Toute mesure implique une interaction: Ce n'est que l'effet de l'énergie dégagée lors de cette interaction qui laisse une trace exploitable.

Par conséquent, chaque fois qu'on mesure une particule, on la détruit. Logique: si on pouvait n'en prélever qu'une partie à fin de mesure, ce ne serait pas une particule élémentaire.

*C'est une situation de tout ou rien: Tant que la mesure n'est pas faite, la particule est totalement indétectable. Et une fois la mesure faite, la particule n'existe plus.*

Au fil de nos expériences, nous rencontrerons des personnages qui, vous vous en rendrez bien vite compte, expriment des opinions fort diverses. Des divergences similaires existent chez les scientifiques. En mécanique quantique en effet, plusieurs *interprétations* se côtoient. Les commentaires contrastés de nos trois manipulateurs devraient nous éviter de prendre parti hâtivement pour telle ou telle vision<sup>3</sup>. Gardons l'esprit ouvert.

N'oublions jamais que nos manipulations n'imiteront jamais parfaitement le comportement des "vraies" particules; c'est la faiblesse de la simulation.

Mais laissons tout de même assez de liberté à notre imagination pour qu'elle se laisse prendre au jeu, le temps de la promenade; c'est la force de la simulation.

3 Cette note n'intéressera que les physiciens. Dans les grandes lignes, on pourra considérer que les opinions défendues par les manipulateurs représenteront approximativement:

- L'interprétation un peu caricaturalement dite "de Copenhague", la plus répandue actuellement.
- Une vision plus "réaliste", qu'on croit généralement avoir été celle d'Albert Einstein.
- et c) Une conception qui, bien que plus "naïve", se rapproche de celle de Carlo Rovelli.

## Expérience 1 - Création d'une particule

Le photon, particule fétiche des physiciens quantiques, a la particularité de posséder, parmi d'autres caractères, un moment magnétique, le **spin**, qui ne peut prendre que deux valeurs, appelées UP et DOWN<sup>4</sup>. Quand on crée un photon, il prend aléatoirement une des deux valeurs, avec exactement autant de chances de prendre l'une ou l'autre<sup>5</sup>.

Traduisons cela dans notre modèle:

Alice prend un jeu de cartes et en retire les jokers. Par définition, les cartes *carreau* et *cœur* sont **rouges**, les cartes *pique* et *trèfle* sont **noires**. Bob mêle soigneusement les 52 cartes, faces cachées et les étale sur la table en désordre, toujours faces cachées.

Charlie choisit une carte au hasard, la glisse dans une enveloppe et ferme cette enveloppe (fig. 2).

Nous appellerons cette enveloppe fermée une **particule**. La carte qui s'y trouve a autant de chances d'être **noire** que **rouge**. A ce stade pourtant, il nous serait possible de connaître la teinte de la carte sans ouvrir l'enveloppe! Comment? Eh bien: En examinant le jeu duquel nous avons extrait notre carte, nous pourrions déterminer la carte qui manque. Corrigeons tout de suite ce défaut:

Alice, Bob et Charlie créent quelques particules de plus, chaque fois en prenant au hasard une des cartes étalées et en la glissant dans une enveloppe qu'ils referment. S'ils veulent être absolument rigoureux, ils convertiront même tout le paquet.

**Lors de la création de nos particules, il est important qu'aucun des expérimentateurs n'aperçoive jamais le recto (la valeur) des cartes manipulées.**

Les particules ainsi créées (les enveloppes fermées) sont rassemblées et mélangées comme des cartes. Dans l'idéal, chaque expérimentateur mélangera le tas à tour de rôle, les deux autres lui tournant le dos.

Nous nous servirons de ces particules dans les expériences qui suivent.

Choisissons une de ces enveloppes.

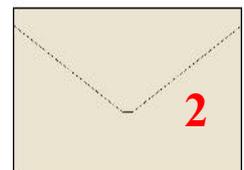
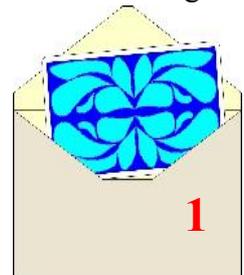
La carte qu'elle contient est-elle **noire** ou **rouge**? Force nous est de constater que le seul moyen de le savoir est d'ouvrir l'enveloppe et de regarder la carte, ce que nous ne faisons pas encore. Aucun raisonnement, aucun calcul ne permet de trancher en faveur d'une *teinte* en particulier. Le recours à des dispositifs extérieurs (caméra ultra-rapide suivant les manipulations des expérimentateurs, équipement de radiologie pour voir à travers les enveloppes, emploi de cartes truquées à poids différents) ne fait pas partie de notre modèle. Et nos expériences ne sortiront jamais du cadre de notre modèle.

### PHOTON ( selon Wikipedia)

En physique des particules, le photon est la particule élémentaire médiatrice de l'interaction

électromagnétique. Autrement dit, lorsque deux particules chargées électriquement interagissent, cette interaction se traduit d'un point de vue quantique comme un échange de photons. Dans la conception actuelle de la lumière, les ondes électromagnétiques, des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, sont toutes constituées de photons.

fig. 2



Définition, dans notre modèle: Une **particule** est une enveloppe fermée contenant une carte (définition valable jusqu'à l'expérience 5 incluse).

4 Un photon qui traverse un champ magnétique voit sa trajectoire déviée. Dans l'appareil de Stern-Gerlach, le dispositif classique, le spin est dit UP si le photon est dévié vers le haut et DOWN s'il est dévié vers le bas. L'impact laisse une trace sur un écran.

5 Les dispositifs généralement utilisés pour créer des photons doivent obéir au principe fondamental de la conservation des grandeurs. Ces appareils créent donc deux photons en même temps qui, pour équilibrer les grandeurs impliquées, ont des spins de valeurs opposées. Comme on utilise un des photons au hasard, on a la même probabilité pour chaque valeur de spin. Et Ah! n'oubliez pas ces paires de photons, nous en reparlerons au chapitre 2...

Dans les expériences suivantes, chaque fois que nous créerons une particule, nous le ferons selon la même méthode, que nous appellerons **protocole standard**:

- 1) piocher une carte au hasard dans un jeu préalablement soigneusement battu.
- 2) sans que personne ne prenne connaissance de la valeur de la carte, la glisser dans une enveloppe.
- 3) fermer l'enveloppe.

Dans nos quatre premières expériences, la mesure de cette particule pourra donner comme résultat **rouge** ou **noir**, avec la même probabilité pour les deux valeurs.

## Expérience 2 - Notre première mesure

Comme nous l'avons évoqué en parlant du photon, la mesure doit détruire la particule.

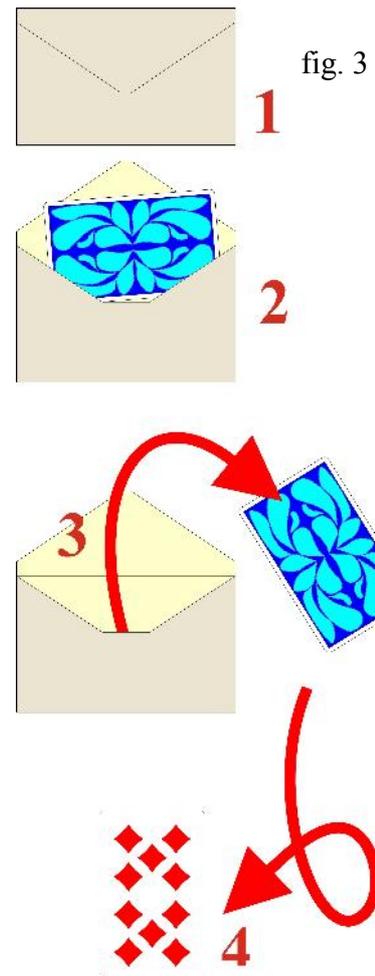
Bob prend l'enveloppe de l'expérience 1 et l'ouvre. Il en sort la carte et la montre aux autres (fig. 3). L'enveloppe n'apporte aucune information, elle peut être remise à la réserve, avec les autres enveloppes vides.

Notons bien que la carte découverte n'est plus une particule, mais seulement la trace de la mesure que nous venons d'effectuer.

**Question: quelle était la teinte de la particule avant la mesure?**

Notre "bon sens" nous pousse à lui attribuer la teinte de la carte présentement exposée. Nous allons voir que ce serait un peu hâtif...

Si nous mesurons ainsi un assez grand nombre de nos particules, nous pouvons valider par la statistique un aspect de notre modèle: les valeurs **rouge** et **noir** apparaissent aussi souvent l'une que l'autre.



### A propos du quantum

Dans le monde microscopique, les échanges d'énergie se font par "paquets" d'énergie de grandeur fixe. Une énergie inférieure à la valeur d'un tel "paquet" ne peut pas s'échanger et tout échange d'énergie supérieure se fait par la transmission d'un nombre entier de ces "paquets". Cette quantité unitaire est appelée quantum. Une mesure représente donc l'échange d'un certain nombre entier de ces quanta. Et la mesure idéale, celle qui retire à l'objet mesuré le moins d'énergie, ne lui coûte qu'un seul quantum. Par conséquent, si l'objet mesuré a pour énergie totale celle d'un quantum, il est fatalement détruit. Dans notre modèle, le quantum est l'information élémentaire *rouge* ou *noir*, qui est obtenue au prix de la destruction de la particule.

### Expérience 3 - *État quantique*

Parmi les particules que nous avons créées dans l'expérience 1, choisissons-en deux. Sans les mesurer, plaçons-les côte à côte et posons nous la question:

#### **Nos deux particules sont-elles identiques ou différentes?**

Réponse de Charlie: - Les deux particules sont un échantillon de toutes celles que nous avons fabriquées. Pour refléter la proportion de toutes ces particules, il est donc probable qu'il y en a une de chaque teinte.

Réponse de Bob: - Puisque **rouge** et **noir** ont la même chance d'apparaître, nous avons 4 possibilités, à probabilités égales:

- 1) **rouge - rouge**, donc identiques,
- 2) **rouge - noir**, donc différentes,
- 3) **noir - rouge**, donc différentes,
- 4) **noir - noir**, donc identiques.

Par conséquent, il y a une chance sur deux qu'elles soient identiques et une chance sur deux qu'elles soient différentes.

Réponse d'Alice: - Tant que nous n'avons pas mesuré les particules, leurs valeurs ne sont pas déterminées. Tout le soin que nous mettons à la création de nos particules sert justement à mettre dans chaque enveloppe une carte de teinte inconnue ayant exactement la même probabilité d'être **rouge** ou **noire**. Les deux particules sont donc identiques, comme d'ailleurs toutes celles que nous avons fabriquées.

Objection de Charlie: - Comment peux-tu dire que toutes les particules sont identiques? Nous savons que la moitié est noire et l'autre rouge!

Remarque de Bob: - Je vois ce qu'Alice veut dire. Comme nous avons mélangé les cartes avant de les mettre dans les enveloppes, elles n'ont pas de teinte déterminée. Pour fabriquer une particule **rouge**, il faudrait mettre dans une enveloppe une carte qu'on sait être rouge parce qu'on l'aurait regardée... ce que notre modèle interdit, précisément!

Mais Charlie insiste: - N'empêche que, même si c'est au hasard, nous avons tout de même mis dans nos enveloppes des cartes *soit rouges, soit noires!* Et pas des cartes grisâtres ou indéterminées!

Alice intervient: - Charlie, je te rappelle que nous faisons de la physique. Ce qui nous intéresse, c'est ce qui se passe **au moment de la mesure**. Ce que les particules font **avant** la mesure ne nous est pas accessible. Tu es libre de croire qu'une particule a une valeur fixe dès le moment de sa création, mais si tu veux que cette idée fasse partie de la théorie, tu dois l'incorporer au modèle; tu dois pouvoir dire: telle particule est **noire** parce que nous l'avons fabriquée de telle ou telle façon. Dans notre modèle, c'est impossible.

Bob s'en mêle: - Regarde, Charlie: je prends une particule au hasard. Selon toi, elle est soit **noire** soit **rouge** et sa valeur est définitive. Mais d'où lui vient cette valeur?

Charlie: - Du hasard, quand nous avons choisi la carte.

Bob: - Maintenant, je pioche au hasard une autre de nos particules et je remets la première à la réserve. Je

mélange la réserve. Comme nous n'avons pas mesuré la première particule, nous pouvons aussi bien la remplacer par la deuxième. C'est une particule au hasard, comme toutes les autres. Si je n'arrête pas d'échanger les particules jusqu'au moment de la mesure, c'est comme si la carte dans l'enveloppe changeait tout le temps de teinte! Et pourtant, la mesure n'en sera pas influencée: on aura toujours exactement une chance sur deux d'obtenir **rouge** ou **noir**! Parce que la particule que tu vas mesurer est par définition une particule prise au hasard. Elles se valent toutes.

Charlie: - Après la carte grisâtre, voici la carte qui clignote! Si on va par là, je pourrais tout aussi bien faire ça (et il le fait): Je prends le second jeu de cartes, que nous n'avons pas utilisé. J'en retire les jokers et je mélange les 52 cartes normales. Je prends une enveloppe vide et j'y mets un joker. Ça me fait une particule, n'est-ce pas? Pour la mesurer, j'ouvre l'enveloppe et je sors le joker. Il n'a pas de valeur déterminée, mais c'est égal puisque d'après vous, toutes les cartes sont pareilles. Alors, pour lui attribuer une valeur, je pioche au hasard une carte dans mon jeu. D'accord, le tirage au sort de la teinte se fait au moment de la mesure et pas au moment de la création. Mais le résultat est identique, parce que le tirage au sort se fait dans les mêmes conditions! Je veux dire: peu importe que la *teinte* de la particule soit tirée au sort au moment de sa création, quelque part sur sa trajectoire ou tout juste avant la mesure. C'est ça que vous voulez? Une théorie du n'importe quoi, oui!

Quelques remarques:

Dans sa première réponse, Charlie commet une erreur en attribuant à un échantillon de deux éléments une quelconque valeur de représentativité statistique. Dans ce sens, la première réponse de Bob est plus correcte. Mais Bob, malgré son analyse statistique tout à fait juste, ne répond pas à la question posée qui est: "Nos deux particules sont-elles identiques ou différentes", mais à une question différente, qui se formulerait ainsi: "Les deux mesures faites sur nos particules donneront-elles des valeurs différentes ou les mêmes valeurs?" La dernière intervention de Charlie est subtile et son raisonnement est parfaitement correct à ce stade. Nous nuancerons notre remarque après l'expérience 5.

Nous venons de rencontrer ici une notion fondamentale de la mécanique quantique: le **principe d'incertitude**<sup>6</sup> qui considère qu'avant la mesure, la particule n'a pas d'état défini. Parce que plusieurs états sont possibles, on parle de **superposition d'états**.

---

6 En 1925, Werner Heisenberg formule ses *relations d'incertitude* pour décrire les trajectoires de particules individuelles. Ces relations interdisent notamment d'attribuer simultanément des valeurs précises à la position et à la vitesse d'une particule. Comme nos particules n'ont qu'une seule dimension (la teinte), notre modèle ne montre ici qu'une retombée secondaire de ce principe. Nous aborderons le sujet de manière plus complète au chapitre 3. Albert Einstein s'opposait à cette vision qu'il considérait comme l'expression d'un traitement statistique d'événements individuels. La mécanique quantique était donc une *théorie incomplète*. Selon lui, il devait exister une façon de définir l'état d'une particule en faisant appel à des variables que la formulation quantique voulait ignorer. Notons que, dans une définition stricte de cette notion, l'objection des *variables cachées* est irrecevable: le mécanisme utilisé dans la création de nos particules fait uniquement et strictement appel au hasard. Une quelconque technique permettant de déterminer la valeur d'une particule au moment de sa création est exclue. Nous verrons plus tard que la notion de *variables cachées* peut avoir une définition plus nuancée.

## Expérience 4 - Valeurs possibles et valeurs moyennes

Dans la pratique, la mécanique quantique s'occupe évidemment d'objets plus complexes que nos particules simplifiées. Un riche outillage mathématique est à sa disposition, dont nous devons ici faire l'économie. Nos calculs se contenteront de notions beaucoup plus rudimentaires.

Donnons arbitrairement à **rouge** la valeur +1 et à **noir** la valeur -1.

Complétons d'abord notre réserve en recréant des particules avec les cartes dévoilées dans l'expérience 1. Si nous avons assez d'enveloppes, nous pouvons aussi convertir en particules les cartes du second jeu. Seuls les jokers ne doivent pas être utilisés. Une fois toutes nos particules créées, Alice les mélange soigneusement et les empile devant elle.

Nous allons mesurer ici non pas des particules isolées, mais des paquets de particules.

Bob et Charlie se munissent chacun d'un bloc et d'un crayon. Chacun divise sa page en 4 colonnes, intitulées -3, -1, +1 et +3.

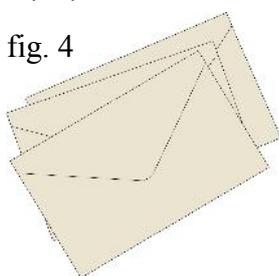


fig. 4

Alice choisit 3 particules qu'elle donne à Bob, puis 3 particules qu'elle donne à Charlie.

Chaque garçon traite maintenant son propre paquet en totalisant les valeurs des 3 mesures qu'il effectue. Ainsi, si deux particules sont noires et une rouge (fig. 5), il enregistrera le résultat de  $(-1) + (-1) + (+1)$  par une marque dans la colonne -1 de son bloc (les valeurs possibles sont rassemblées sur la fig. 6).

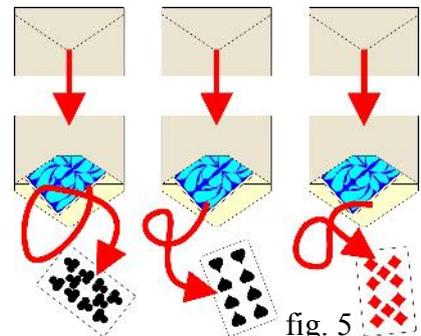
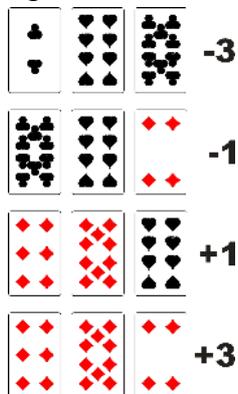


fig. 5

Les enveloppes ouvertes et les cartes dévoilées sont ensuite écartées.

fig. 6



Tant que sa réserve de particules le lui permet, Alice continue ainsi à donner alternativement à Bob et à Charlie des paquets de 3 particules, que les garçons mesurent comme leur premier paquet (Il se peut que Bob reçoive un paquet de plus que Charlie, mais ça n'a pas d'importance).

Quand Alice a épuisé ses particules, on compte le nombre de marques dans chaque colonne des blocs. L'allure générale des deux rapports est sensiblement la même (fig. 7):

- à peu près autant de -1 que de +1
- à peu près autant de -3 que de +3
- à peu près trois fois plus de  $\pm 1$  que de  $\pm 3$

La moyenne générale est par conséquent proche de 0<sup>7</sup>.

- à peu près autant de -1 que de +1

- à peu près autant de -3 que de +3

- à peu près trois fois plus de  $\pm 1$  que de  $\pm 3$

La moyenne générale est par conséquent proche de 0<sup>7</sup>.

Ce qui est logique et reflète la superposition d'états de chaque particule, dont la mesure peut aussi bien donner -1 que +1, donc 0 en moyenne. Observons que même si les valeurs extrêmes sont rares, elles existent: une addition de "valeurs moyennes zéro" peut donc donner, à l'occasion, un total important. Le comportement d'un paquet de particules diffère du comportement d'une particule seule. La valeur d'un tel paquet se présente en pratique comme un **nuage** de valeurs centrées autour d'une moyenne. Le centre du nuage est plus

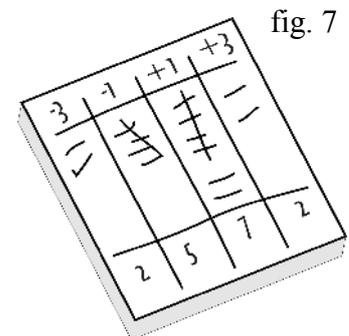


fig. 7

<sup>7</sup> Notons la "bizarrerie" suivante: bien que 0 soit la valeur la plus probable de chaque paquet que nous avons mesuré, elle n'apparaît jamais. Ce "trou" à la valeur 0 (ainsi qu'à toutes les valeurs paires) apparaît évidemment chaque fois que cette expérience implique un nombre impair de cartes dans chaque paquet. Quand les paquets sont très gros, la distinction pair-impair n'a plus de sens: la statistique des mesures apparaît alors comme une courbe en cloche qu'on peut considérer comme continue en pratique.

Des courbes présentant des trous ou des marches sont usuelles, même inévitables, dans le monde quantique (notamment en thermodynamique et en chimie)

dense que les bords.

### Expérience 5 - *Fonction d'onde*

Après l'expérience 4, il reste peut-être une ou deux particules intactes. Mesurons-les, juste pour les détruire. Maintenant, toutes nos enveloppes sont vides. Les jokers restent de côté, inutilisés.

Chaque expérimentateur prend une partie des 104 cartes normales et écarte tous les *carreaux*. Charlie prend les cartes écartées et vérifie que ce sont bien les 26 carreaux, qui ne serviront pas dans l'expérience.

Les 78 cartes restantes sont mélangées face cachée. Des particules sont créées comme dans l'expérience 1, puis soigneusement mélangées.

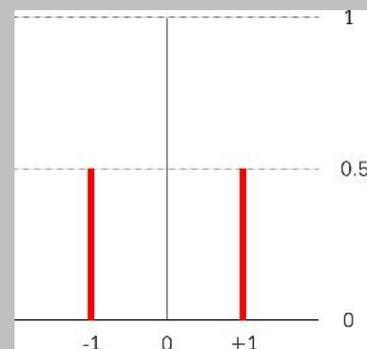
On répète maintenant exactement l'expérience 4: Bob et Charlie, chacun avec son bloc, qui reçoivent d'Alice des paquets de 3 cartes.

A la fin de l'expérience, les deux rapports des garçons auront à peu près la même allure asymétrique: seul un petit tiers de résultats à valeurs positives, la plupart des résultats de valeur -1. La valeur moyenne de chaque bloc est de -1. Normal, n'est-ce pas, puisque nous avons "truqué" nos jeux en écartant les carreaux. Mais chaque particule, comme dans les expériences précédentes, ne peut toujours prendre que les valeurs -1 et +1. Seulement maintenant, cette simple définition de "plus ou moins 1" ne suffit plus à décrire la particule et surtout ne permet plus de prédire le résultat de nos mesures...

Pour éviter d'avoir recours aux mathématiques spécialisées, nous représenterons l'état de nos particules sous forme de diagrammes. Cet outil grossier nous suffira ici, parce que les particules de notre modèle ont un comportement particulièrement simple.

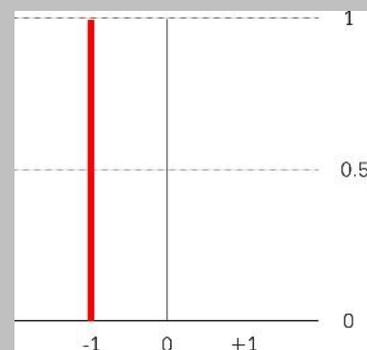
#### Diagramme 1: Une de nos particules habituelles (celles des expériences 1 à 4)

Le diagramme se lit:  
probabilité de 0.5 (50 %) pour une valeur de -1  
probabilité de 0.5 pour une valeur de +1



#### Diagramme 2: Une particule "noire"

Jusqu'ici, nous n'en avons pas encore rencontrée!  
*Il aurait fallu tricher pour la fabriquer.*  
Le diagramme se lit:  
probabilité 1 (100 %) pour une valeur de -1.



Tant que l'absence de mesure permet à une particule quantique de ne pas "choisir" sa valeur, tous ses états possibles sont dits superposés. Dans nos expériences, la particule a deux états simultanément, mais ces états

ne peuvent pas être réels et complets, parce qu'alors on aurait deux particules!<sup>8</sup> Cette superposition d'états peut être vue comme une information véhiculée par la particule, un "mode d'emploi" qui sera lu au moment de la mesure et qui forcera le résultat de la mesure à être statistiquement conforme à ce qui est représenté sur le diagramme. On voit que malgré le choix très limité dans le résultat d'une mesure faite sur une de nos particules (2 valeurs possibles en tout et pour tout), cette dernière porte en elle des informations très précises quant aux contraintes auxquelles est soumis le "tirage au sort" qui détermine la valeur de la mesure.

Dans le cas de nos particules, il est clair que cette précieuse information n'est pas stockée sous forme directement matérielle, elle n'est pas visible sur la carte ni "quelque part dans l'enveloppe", bien qu'elle soit transportée avec la particule. Ce comportement fait ressembler une particule quantique davantage à une onde (véhiculant une information immatérielle) qu'à un grain de matière (qui ne peut avoir qu'un seul état). L'expression mathématique qui représente les probabilités des valeurs de la particule au moment de sa mesure est appelée **fonction d'onde**<sup>9</sup>. Un peu abusivement, nous utiliserons nous aussi ce terme, par analogie, même si nos grossiers diagrammes n'ont pas la richesse des notations utilisées par les spécialistes.

Diagramme 3:  
les paquets de 3 particules de l'expérience 4.

probabilité de 0.125 de présenter un total de -3  
probabilité de 0.375 de présenter un total de -1  
mêmes probabilités pour les valeurs positives



Diagramme 4:  
Les paquets de l'expérience 5.  
Par rapport au diagramme 3, allure générale décalée vers les valeurs négatives

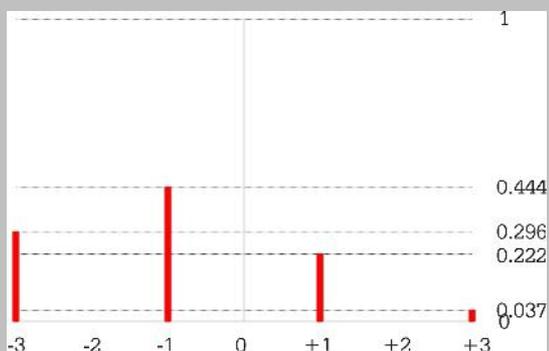
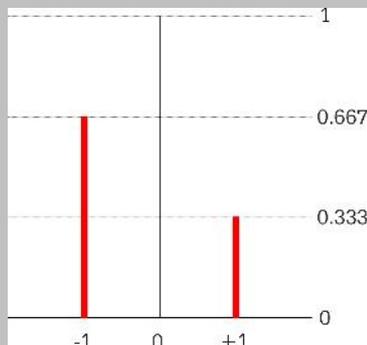


Diagramme 5:  
Une particule de l'expérience 5.



8 On observe sur nos diagrammes que la somme des probabilités pour les deux valeurs possibles est toujours de 1. On a donc bel et bien toujours exactement une particule.

9 L'expérience 6 nous montrera la nécessité de recourir à ce terme d'onde.

La fonction d'onde peut nous apparaître comme un artifice pour masquer notre ignorance de la valeur d'une particule. Mais nos expériences 4 et 5 nous montrent que les particules portent en effet cette information, puisque nous venons de mettre en évidence une fonction d'onde par des mesures faites bien après la création des particules.

On peut imaginer une expérience où un des manipulateurs prépare à sa guise un jeu de cartes en y introduisant un déséquilibre (connu de lui seul) entre *rouge* et *noir* différent de celui de l'expérience 5; en mesurant les particules créées à partir de ce jeu, les deux autres manipulateurs, par un protocole qui peut être celui de l'expérience 5, peuvent déterminer la fonction d'onde de ces particules. Ceci est proposé comme une expérience imaginaire, car les deux dernières expériences ont été plutôt longues. Mais les lecteurs et lectrices assez courageux pour se lancer dans sa réalisation sont cordialement invités à faire ce travail.

D'ailleurs, au cours de nos promenades, s'il vous vient l'envie ou le besoin de faire une expérience de votre cru pour confirmer ou infirmer<sup>10</sup> les résultats des expériences proposées, ne vous retenez surtout pas!

Le propos de notre modèle est de simuler des expériences faites sur des particules ne pouvant présenter que deux valeurs différentes. Par conséquent, nous limitons la lecture des cartes à une seule grandeur (ou dimension): la *teinte*. Il est clair que les autres caractères des cartes pourraient aussi donner lieu à des mesures. Si par exemple on distingue les cartes *paires* des cartes *impaires* (l'as valant 1, le valet 11, la dame 12 et le roi 13), un jeu est formé de 24 cartes *paires* et de 28 cartes *impaires*. Par rapport à ce caractère, notre diagramme (représentation simplifiée de la fonction d'onde d'une particule) sera asymétrique (environ 46% pour *pair* et environ 54% pour *impair*). Si on distingue les cartes *habillées* (les valets, dames et rois) des autres, le diagramme, par rapport à ce caractère, donnera environ 23% pour les *habillées* et environ 77% pour les autres. De fait, de nombreux caractères peuvent être pris en compte et tous ces caractères coexistent. On comprend la nécessaire complexité d'une représentation mathématique qui rassemble en une seule expression les probabilités de toutes les variables pertinentes. Voilà pourquoi nous simplifions nos particules au point de pouvoir nous contenter de nos diagrammes.

Avant l'expérience suivante, rangeons un peu: Remettons les cartes *carreau* avec les autres (les jokers restant seuls inutilisés) et mélangeons les cartes (les deux jeux ensemble).

Une remarque encore: à la fin de l'expérience 3, Charlie a brillé en utilisant une particule fabriquée avec un joker. Nous avons alors accepté la justesse de sa démonstration. On pourrait imaginer appliquer la même méthode pour mettre en évidence la fonction d'onde du diagramme 5: Un joker est mis dans une enveloppe pour créer une "particule" qui est ensuite mesurée en piochant une carte dans un jeu préparé comme celui de l'expérience 5. On voit maintenant le défaut de cette méthode: il est indispensable de reconstituer la composition exacte du jeu "d'origine" avant d'effectuer le tirage qui remplace le joker. Alors que quand nous créons une particule "normale", en piochant une carte dans un jeu, cette particule se voit attribuer une fonction d'onde qui reflète exactement la composition du jeu utilisé, **même si nous ignorons la composition de ce jeu**. Le jeu peut ensuite être modifié ou même détruit, la particule gardera intacte la

---

10 On se méfie assez naturellement des idées nouvelles. C'est une élémentaire hygiène mentale qui consiste à traiter toute idée comme suspecte, même si elle est "établie" depuis longtemps. Celles qui touchent à la mécanique quantique ont beau être bientôt centenaires pour certaines, elles ne doivent pas être à l'abri de nos doutes. Mais il ne s'agit pas de choisir selon ses sentiments ou de voter pour son idée préférée! La démarche scientifique, heureusement, consiste à mesurer la validité des idées par l'expérimentation seulement. Ce qui mène le scientifique parfois à devoir accepter une théorie qui ne lui plaît pas ou à rejeter une idée particulièrement séduisante. Donc: doutez et expérimentez!

fonction d'onde qu'elle a acquise lors de sa création. D'autre part, comme nous le verrons dans l'expérience 7, la fonction d'onde peut subir des modifications, qui ne seraient pas forcément répercutées sur le jeu qui servirait au tirage au sort. La méthode Charlie-joker n'était donc qu'une curiosité au moment de sa présentation et s'avère inutilisable.

## Expérience 6 - *Corpuscule ou onde*

Bob et Charlie prennent place côte à côte, en face d'Alice.

Alice crée une particule, selon le protocole standard. Au milieu de la table, on pose un bloc-note (détourné de son emploi habituel), auquel on prête l'étonnante faculté d'attribuer la particule d'Alice soit à Bob, soit à Charlie, **selon la valeur que la particule aura au moment de la mesure** (fig. 8):

Si c'est Bob qui reçoit la particule, il faut que sa mesure donne **rouge**. Une éventuelle mesure donnant **noir** est ignorée.

Si c'est Charlie qui reçoit la particule, il faut que sa mesure donne **noir**. Une éventuelle mesure donnant **rouge** est ignorée.

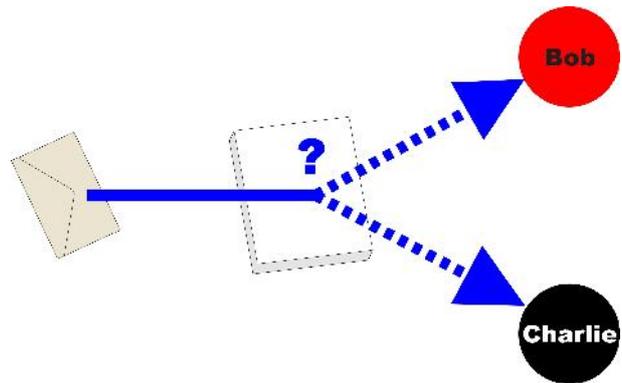


fig. 8

Examinons le problème de différents points de vue...

### 1) La vision du "bon sens".

PRINCIPE: la particule a une valeur déterminée même si nous ne savons pas laquelle.

Le problème ne peut être résolu que par la tricherie (coup d'œil furtif dans l'enveloppe, dispositif permettant de voir à travers l'enveloppe et qui ne ferait donc pas partie de notre modèle, escamotage de l'enveloppe et remplacement par une enveloppe garnie d'une carte de valeur connue, mensonge de Bob et Charlie quant au résultat de la mesure.)

### 2) La vision de l'adepte des "variables cachées".

PRINCIPE: la particule aurait une valeur déterminée si nous connaissions exactement tous les gestes que nous avons faits pour créer la particule.

Le problème est insoluble parce que notre équipement ne nous permet pas de reconstituer la genèse de la particule. Seul espoir: améliorer nos observations des processus de création impliqués.

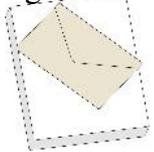
### 3) La vision quantique.

PRINCIPE: Nous connaissons la fonction d'onde de notre particule, qui lui permet d'être aussi bien rouge que noire.

Tant que la mesure n'est pas faite, la particule a deux valeurs à la fois. Au moment de la mesure, une seule devient effective.

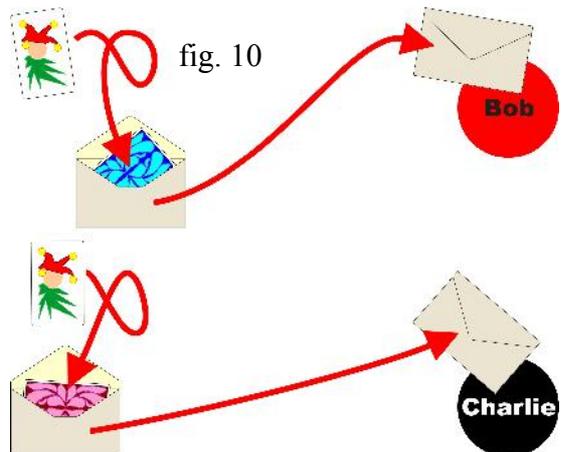
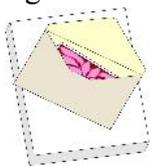
Démonstration:

fig. 9



Alice pose sur le bloc la particule de l'expérience (fig. 9). En s'inspirant peut-être du procédé de Charlie dans l'expérience 3, elle prend deux jokers, les glisse chacun dans une enveloppe et donne une enveloppe à chacun des garçons (fig. 10). Attention! Ces enveloppes ne sont pas deux particules, mais bien une seule, à deux endroits à la fois (elle est obligée d'être aux deux endroits puisqu'elle est en même temps *rouge* et *noire*). Ce faisant, elle se comporte comme une onde de probabilité, dont la portée atteint autant Bob que Charlie).

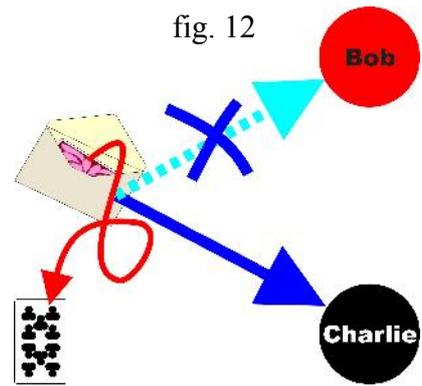
fig. 11



Depuis que l'enveloppe sur le bloc a été remplacée par les deux enveloppes à joker, elle n'est plus une particule, mais seulement un témoin permettant de garder intacte la fonction d'onde de la seule particule de l'expérience. On symbolise son statut en ouvrant l'enveloppe sans sortir la carte (fig. 11).

On retire le bloc (mais pas l'enveloppe) de la table, pour bien signifier qu'il a terminé son travail.

Maintenant, Bob et Charlie peuvent mesurer leur "particule". Par définition, la fonction d'onde de la particule (insistons bien sur le fait qu'il n'y a qu'une particule) s'effondre. Mais il s'agit toujours de la fonction d'onde de la particule d'origine d'Alice. La valeur de la mesure est donc celle de la carte de l'enveloppe d'Alice. Et selon cette valeur, un seul des garçons verra sa mesure se réaliser (fig. 12).



Cette expérience reproduit schématiquement l'appareil de Stern-Gerlach permettant de mesurer le spin d'un photon, que nous avons évoqué au cours de l'expérience 1. Les croquis suivants vont nous permettre de présenter les principales **interprétations** de la mécanique quantique.

fig. 13: Un dispositif émet un photon dont le spin est DOWN.

Le discriminateur dévie la particule vers le bas.

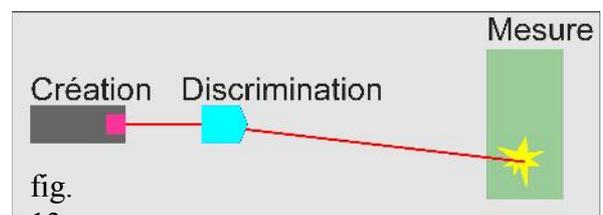
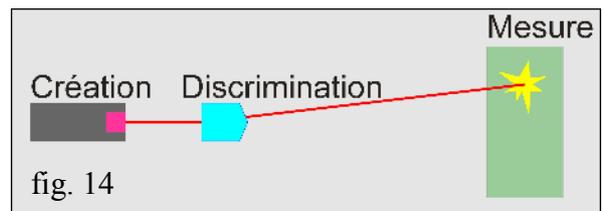


fig. 14: Même situation, avec un photon dont le spin est UP.



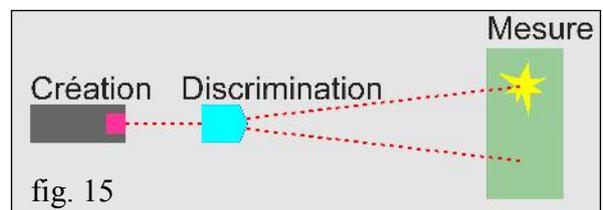
Dans ces deux premiers cas, la particule est dite **nette**, parce que sans superposition d'états. Là, toutes les interprétations sont d'accord. Notons que dans notre modèle, nous ne savons pas encore créer sans "tricher" de telles particules nettes (ce sera le sujet de l'expérience 10).

Dans tous les cas suivants, le dispositif émetteur produit une particule quantique comparable aux nôtres: un photon en superposition d'états.

fig. 15: Interprétation dite de Copenhague<sup>11</sup>:

La fonction d'onde du photon reste intacte jusqu'au moment de la mesure. Comme cette fonction d'onde permet au photon d'être UP et DOWN en même temps et que sa trajectoire dépend du discriminateur, le photon doit nécessairement se trouver à la fois sur les deux trajectoires.

**Dans notre modèle:** Les deux jokers sont porteurs de la même fonction d'onde jusqu'au moment de la mesure.



11 Formulée par Niels Bohr dans les années 1920. Selon lui, il existe une frontière entre le monde quantique, régi par des lois probabilistes, et le monde macroscopique, qui suit les lois déterministes connues auparavant.

fig. 16: Variante de l'interprétation de Copenhague.

A sa création, le photon est en superposition d'états. Mais en traversant le discriminateur, le photon interagit avec le monde macroscopique, ce qui équivaut à une mesure. La fonction d'onde **s'effondre**<sup>12</sup> et le photon suit la trajectoire déterminée par son spin.

**Dans notre modèle:** La particule prend sa valeur définitive au moment où on ouvre l'enveloppe sur le bloc. Un des deux jokers (celui qui va à la destination correcte) hérite de la totalité de la fonction d'onde "effondrée". L'autre joker n'est qu'une particule fictive qui suit la trajectoire correspondant à une valeur inexistante.



fig. 17: Interprétation des mondes multiples<sup>13</sup>.

Au lieu de considérer que l'émetteur produit un photon en superposition d'états, on considère que deux photons sont créés, un UP dans un monde et un DOWN dans un autre monde. Les deux mesures coexistent, dans des mondes différents<sup>14</sup>.

**Dans notre modèle:** La mesure de Bob donne toujours la valeur *rouge* et la mesure de Charlie toujours la valeur *noir*. Les deux mondes coexistent. La valeur de la carte de l'enveloppe d'Alice nous révèle dans quel monde nous nous trouvons **après** la mesure.

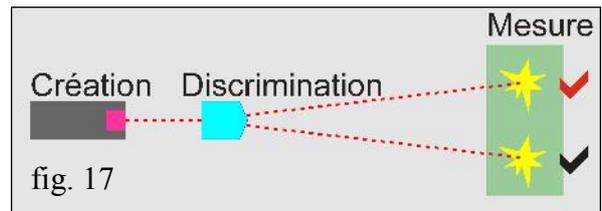


fig. 18: Interprétation "réaliste"<sup>15</sup>

La fonction d'onde est une représentation mathématique de notre ignorance de l'état du photon. Mais cet état (bien que nécessairement inconnu avant la mesure) est déterminé dès le moment de sa création. La trajectoire du photon est unique, même si on ne peut la déterminer qu'après la mesure.

**Dans notre modèle:** La valeur de la particule est fixée dès sa création. Les deux trajectoires des jokers sont uniquement la description de celles qui sont possibles. La mesure de la particule d'origine valide "après coup" une des trajectoires.



Et nous voici obligés d'accepter le raisonnement suivant:

SI a) La trajectoire d'une particule dépend de l'état de cette particule

ET SI b) Une particule peut être en superposition d'états - donc avoir en même temps deux états de la même propriété,

ALORS: la particule suit forcément en même temps chacune des trajectoires possibles!

12 Quand une mesure modifie la fonction d'onde d'une particule au point de ne lui laisser plus qu'une seule valeur possible, on dit que la fonction d'onde de cette particule s'effondre. Le terme peut paraître mélodramatique. Mais quand une information apparemment anodine permet sur un tableau noir à une grosse équation de se voir simplifiée à grands coups de craie, et qu'après l'assaut une dizaine de signes seulement survivent au massacre, on peut certainement parler d'effondrement.

13 La théorie d' Hugh Everett, proposée en 1957, est très en vogue chez ceux que dérange l'aspect probabiliste de la mécanique quantique. En effet, dans cette interprétation, le hasard n'a plus sa place, puisque tous les possibles coexistent.

14 On peut aussi estimer que la fonction d'onde est intacte jusqu'au moment de la mesure et que ce n'est qu'alors que deux mondes sont créés.

15 Le terme est utilisé au sens large. L'hypothèse appelée "réalisme" ou plus exactement "réalisme direct" estime qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer une mesure pour qu'une particule prenne une certaine valeur, si on peut déterminer cette valeur par d'autres moyens que la mesure. Nous aurons l'occasion d'en reparler.

Une particule qui se trouve en plusieurs endroits à la fois ne peut plus être considérée comme un "grain de matière". Elle se comporte comme une onde qui propage une information. Le photon jouit en effet de cette propriété de devoir être considéré tantôt comme un **corpuscule**, tantôt comme une **onde**. Pour beaucoup de savants, cette **dualité** est une gêne permanente; il est vrai qu'aucune interprétation à ce jour n'en donne une explication satisfaisante.

Il est intéressant de constater que notre modèle, pour l'instant, se montre capable de "coller" à chacune des principales interprétations! Jusqu'à rendre possible les mêmes disputes que celles qui opposent les physiciens. Mais évitons de choisir notre camp trop tôt, nous avons encore pas mal de "bizarreries" à affronter...

**Les jokers doivent maintenant être définitivement écartés. Ils ne seront plus mentionnés.**

## Expérience 7 - Action à distance

Pour la dernière expérience du chapitre, nous allons faire une entorse à notre protocole standard:

Nous choisissons délibérément 2 cartes noires et 2 cartes rouges. Chacune est mise dans une enveloppe et les quatre enveloppes sont soigneusement mélangées<sup>16</sup> (fig. 19).

Chaque particule porte ainsi la fonction d'onde la plus banale que nous connaissons, celle du diagramme 1 (page 12). Ces 4 particules doivent absolument rester ensemble.

On crée exactement de la même façon 26 groupes de 4 particules, qu'on dispose sur la table de manière à s'assurer que chaque particule reste strictement dans son groupe de 4 (fig. 20).

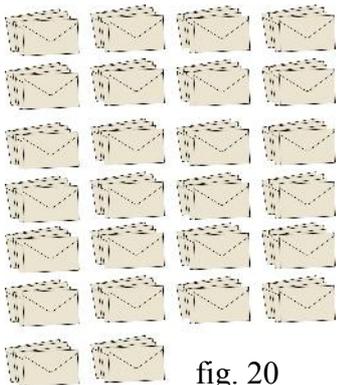


fig. 20

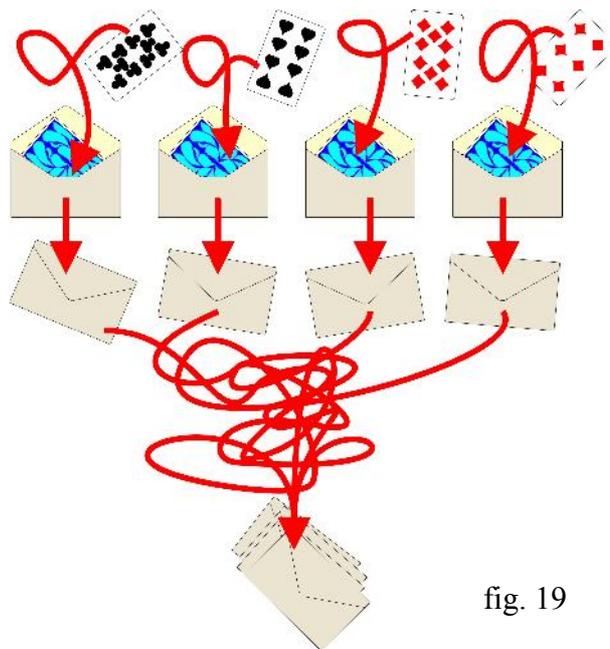


fig. 19

Bob et Charlie s'installent dos à dos.

Alice distribuera des particules aux garçons.

Charlie se munit d'un crayon et d'un bloc qu'il partage en deux colonnes intitulées *rouge* et *noir*, qui vont se remplir peu à peu.

Bob a la consigne suivante: Après avoir mesuré sa particule, il annonce la valeur **inverse**. Autrement dit, si sa mesure donne *noir*, il annonce: "rouge!" - et vice-versa. Cette annonce est une prédiction de la mesure que fera Charlie.

Charlie a la consigne suivante: Il mesure sa particule après l'annonce de Bob et il note le résultat de la mesure de sa propre particule dans la colonne dont le titre est la teinte annoncée par Bob. Ainsi, si Bob a annoncé "rouge!", Charlie sélectionne cette colonne, puis mesure sa particule, puis note le résultat (*rouge* ou *noir*) dans la colonne **rouge** demandée par Bob.

### Déroulement de l'expérience:

- 1) Alice prend les 4 particules d'un groupe.
- 2) Elle en donne une à Bob et une à Charlie.
- 3) Les 2 particules non utilisées sont mises au rebut (fig. 21).
- 4) Bob mesure sa particule et annonce la valeur "inverse".
- 5) Charlie sélectionne la colonne correspondante, mesure sa particule et note le résultat dans la colonne demandée par Bob.
- 6) Les enveloppes et les cartes des particules mesurées sont mises au rebut.

On reprend exactement le même protocole (actions 1 à 6) avec un nouveau groupe de 4 particules... et on recommence, jusqu'à épuisement des groupes de 4.

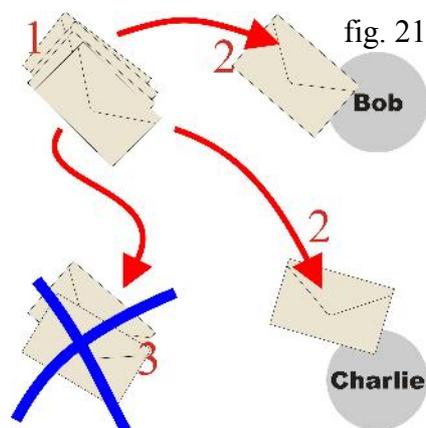


fig. 21

<sup>16</sup> L'entorse que nous commettons n'est pas gravissime. En fait, nous apprendrons dans le chapitre suivant comment obtenir la même composition par des moyens plus rigoureux.

Maintenant, on examine le bloc de Charlie. Dans la colonne **rouge**, on trouve deux fois plus de mentions *rouge* que de mentions *noir*. Dans la colonne **noir**, on trouve deux fois plus de mentions *noir* que de mentions *rouge* (fig. 22).

Ce résultat est troublant...<sup>17</sup>

La fonction d'onde "basique" de la carte de Charlie oblige celle-ci à présenter *rouge* ou *noir* au hasard et en proportions égales. Mais si ses mesures s'étaient faites vraiment au hasard, chaque colonne de son bloc devrait présenter autant de *rouge* que de *noir*. Nous sommes obligés de constater que les mesures de Bob influencent celles de Charlie! Mais comment?

fig. 22

### Hypothèse de Charlie

Nous avons fait peu de mesures et il aurait été étonnant d'avoir des résultats parfaitement équilibrés. De plus, la manière de noter fausse probablement le résultat: Quand Bob se trompe dans sa prédiction, il faudrait peut-être noter la faute dans les deux colonnes.

Bob: - Pourquoi dans les deux colonnes?

Charlie: - Il paraît que les particules ont les deux valeurs en même temps. Donc si tu te trompes, tu es en quelque sorte en "situation d'erreur". Tu aurais aussi bien pu annoncer l'autre teinte et te tromper aussi. Donc, il faut noter ce fait dans les deux colonnes.

Bob: - Et quand ma prédiction est juste, il faudrait la noter comme correcte aussi dans les deux colonnes, selon le même raisonnement.

Charlie: - Mais alors, ça ne changerait rien, voyons! Mon raisonnement est peut-être faux, mais j'essaie d'être logique: Ta particule a une valeur au hasard. Par conséquent, ta prédiction se fait au hasard. Et ma particule a une valeur au hasard. Donc, si on n'a pas le même nombre de *rouges* que de *noirs* dans chaque colonne, c'est que nous faisons une erreur quelque part... et j'essaie de la corriger!

Bob: - Autrement dit, tu essaies de truquer les résultats pour qu'ils conviennent à ton idée! C'est le pire crime qu'un scientifique puisse commettre!

Charlie: - Alors, comment tu expliques nos résultats?

### Hypothèse de Bob

Nos particules ont en effet avant la mesure autant de chances d'être *rouges* que *noires*. Si nous les avons prises dans un gros tas de particules, comme dans nos premières expériences, je parie qu'on aurait en effet eu dans chaque colonne le même nombre de *rouges* que de *noirs*<sup>18</sup>. Mais là, nos particules viennent chaque fois d'un petit tas de 4 cartes, dont on a préparé la composition. Je représente toutes les possibilités de distribution sur un tableau (il le dessine sur son bloc). Je note N pour *noir* et R pour *rouge*:

	( )	( )	B	C
1)	N	N	R	R
2)	N	R	N	R
3)	N	R	R	N
4)	R	N	N	R
5)	R	N	R	N

<sup>17</sup> Le calcul de probabilités connaît un principe, *les inégalités de Bell*, qui limite les coïncidences entre événements aléatoires indépendants (John Stewart Bell, 1928-1990). Selon ce principe, si les mesures de Bob et de Charlie étaient indépendantes, chacune de nos colonnes devrait présenter autant de *rouges* que de *noirs*. Notre expérience, qui montre une violation des inégalités de Bell, est comparable à des expériences faites sur des photons. La plus connue est le "test CHSH Bell", décrite en 1969 par Clauser, Horne, Shimony et Holt. C'est le sujet du chapitre 5.

<sup>18</sup> Vous êtes vivement invité (e)s à faire cette expérience!

## 6) R R N N

Les cartes des deux premières colonnes ne sont pas mesurées, celle de la troisième colonne est la mienne et celle de la quatrième colonne est celle de Charlie.

Dans les distributions 1 et 6, nos deux cartes sont identiques et ma prédiction sera donc fausse. Mais dans les 4 autres cas, ma prédiction sera juste. Quatre fois sur six, donc deux fois sur trois, comme l'expérience le prouve.

---

### Hypothèse d'Alice

Bob, ton explication est bien conforme à ton esprit déterministe. Mais nous aurions pu faire notre expérience avec des groupes non pas de 4, mais disons de 24 particules. D'accord, il aurait fallu ajouter pas mal de jeux de cartes et faire un grand nombre de mesures. De plus, le rapport entre "justes" et "faux" aurait été moins flagrant que nos 2/3. Mais surtout: ton tableau aurait été gigantesque!<sup>19</sup> Je préfère la vision quantique:

Au moment de leur création, les particules de Bob et de Charlie portent la même fonction d'onde familière, celle du diagramme 1 (page 12). Quand Bob fait sa mesure, il modifie la fonction d'onde de la particule de Charlie. La nouvelle fonction d'onde est la même que celle qu'on aurait donnée à la particule en la créant à partir d'un tas de 3 cartes (le tas originel de 4 cartes, amputé de la carte dévoilée par Bob), fonction d'onde représentée par le diagramme 5 (page 13) ou son symétrique (valeurs -1 et +1 interverties). La mesure de Charlie est maintenant conforme à cette nouvelle fonction d'onde et la prédiction de Bob se réalise par conséquent deux fois sur trois.

Consternation de Charlie: - La mesure de Bob agirait à distance sur ma particule?

Alice: - C'est bien ce qui s'est passé, non?

Bob: - Tu y vas quand même un peu fort. Si tu avais envoyé la particule de Charlie à l'autre bout du monde, l'effet à distance aurait dû se produire aussi?

Alice: - Bien sûr. Et l'effet est instantané.

Bob: - C'est très élégant et poétique, mais un peu trop à mon avis.

Alice: - Tu t'accroches à ton réalisme! Mais réfléchis: ces tableaux que tu dresses ne sont au bout du compte qu'une autre représentation de la fonction d'onde.

Bob: - On pourrait aussi bien dire que ta fonction d'onde est une autre représentation de mes tableaux!

Alice: - Sauf que pour établir tes tableaux, tu dois attribuer aux particules des valeurs prédéterminées, ce qui est contraire à notre modèle<sup>20</sup>.

Charlie marmonne: Des cartes à jouer qui sont en deux endroits à la fois, qui agissent à distance et se transportent instantanément à l'autre bout du monde. Ça commence à devenir vraiment louche. Pourvu que rien n'explose...

---

<sup>19</sup> 2'704'156 distributions possibles.

<sup>20</sup> La remarque d'Alice est juste. Dans l'expérience 5, par exemple, si on ne connaissait pas la composition du jeu de cartes utilisé, Bob ne pourrait appliquer sa méthode qu'après coup, à partir de... la fonction d'onde mise en évidence par les mesures!

## Chapitre 2

### Particules intriquées

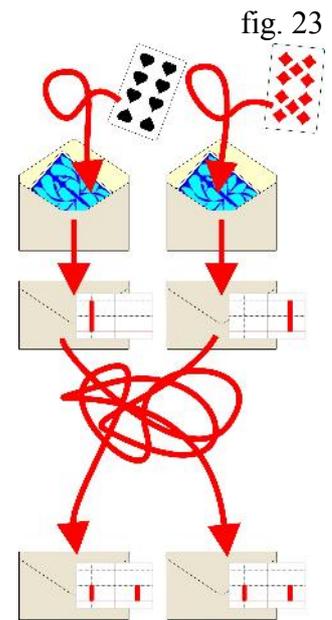
#### Expérience 8 - Création d'une paire intriquée

Prenons délibérément une carte *rouge* et une carte *noire*, que nous mettons chacune dans une enveloppe. Charlie bondit: - Tricherie! Ce ne sont pas des valeurs indéterminées!

Bonne réaction, en effet. La manipulation mérite des explications:

Au cours de l'expérience 1, nous avons évoqué la création des photons en laboratoire. Pour respecter les lois de conservation des grandeurs, ce ne sont pas des photons individuels qui sont produits, mais des paires de photons, dont les caractéristiques sont opposées, dans le sens qu'elles s'annulent lorsqu'elles sont additionnées. De cette manière la production de ces deux valeurs opposées ne coûte littéralement aucune énergie. C'est une astuce que la nature utilise absolument chaque fois que c'est possible. Donc, quand des photons sont produits par paires, il est inévitable que leurs spins soient opposés. C'est ce que nous reproduisons dans notre modèle.

Charlie a raison: nos deux particules sont nettes: nous les avons fabriquées ainsi, chacune avec une fonction d'onde "effondrée" (fig. 23). Mais maintenant, nous mélangeons ces particules (pour être sûrs que, même inconsciemment, aucun des manipulateurs ne puisse distinguer les particules, chacun peut les mélanger à tour de rôle, les autres tournant le dos). Ce faisant, nous permettons aux deux particules d'acquérir la même fonction d'onde, intacte, celle qui nous est la plus familière (diagramme 1, page 12)<sup>21</sup>.



Nous voici donc avec deux particules ayant la même fonction d'onde. Mais leurs fonctions d'onde sont **corrélées**<sup>22</sup> et vont évoluer ensemble. Toute modification de la fonction d'onde de la première impliquera une modification de la fonction d'onde de la seconde particule. Les particules de la paire sont dites **intriquées** tant leur destin est lié. On parle aussi de **paire intriquée**. Le concept n'est pas tout à fait nouveau pour nous, puisque nous avons constaté un comportement assez similaire de nos particules dans l'expérience 7. La paire intriquée applique en fait le même principe que celui qui se manifeste dans l'expérience 7, en le poussant à l'extrême: au lieu d'avoir un groupe de 4 particules, nous avons un groupe de 2.

Cette manière de créer nos particules reflète tellement bien la création de photons en laboratoire et dans la nature que, dans notre modèle, nous l'appellerons **protocole naturel**. Il aurait d'ailleurs pu dès nos premières expériences remplacer notre **protocole standard**. En créant une paire et en éliminant au hasard (surtout sans la mesurer!) une particule, on aurait même un procédé plus rigoureux<sup>23</sup>. Mais il valait mieux commencer le

21 Niels Bohr a très tôt reconnu qu'une fonction d'onde pouvait être affectée par des interactions avec le milieu macroscopique. L'effet le plus intéressant, dont nous profitons ici, est la récupération d'une fonction d'onde altérée ou même "effondrée". Nous reviendrons sur ce phénomène quand nous parlerons de la décohérence.

22 Plus exactement, elles sont anticorrélées: En effet, un changement sur l'une des particules correspond sur l'autre particule à un changement dans le sens opposé.

23 Le jeu n'ayant pas besoin d'être préalablement mélangé, on évite le risque d'introduire des *variables cachées* à ce stade. Par ailleurs, si on convertit tout un jeu en particules selon notre protocole standard, on pourrait objecter que chaque fois qu'on prélève une carte, la composition du reste du jeu est modifiée; et que par conséquent, la fonction d'onde de chaque particule créée est différente. A l'extrême, on pourrait même estimer que la dernière carte du jeu, ne pouvant pas être piochée au hasard, donne naissance à une particule "nette"

plus simplement possible. Les puristes parmi vous sont invité (e)s à refaire l'expérience 7, en fabriquant cette fois les tas de 4 cartes en groupant deux paires anticorrélées créées selon notre protocole naturel.

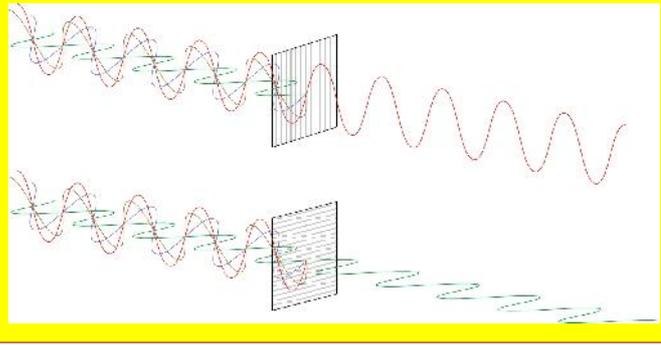
L' **intrication** est un des sujets les plus troublants et les plus passionnants de la mécanique quantique. C'est pourquoi ce chapitre sera le plus fourni.

Deux particules sont **intriquées** quand leurs fonctions d'ondes ne sont pas indépendantes l'une de l'autre. Quand la modification de la fonction d'onde d'une des particules de la paire implique ou provoque une modification similaire de la fonction d'onde de l'autre particule, on dit qu'elles sont **corrélées**. Quand la modification de la fonction d'onde d'une des particules implique ou provoque une modification en sens inverse de la fonction d'onde de l'autre particule, on dit qu'elles sont **anticorrélées**.

Les possibilités théoriques de créer des paires de particules intriquées sont nombreuses, mais aucune n'est facile à mettre en œuvre. Même la méthode la plus "simple" pour créer une paire de photons intriqués selon leurs spins, qui utilise un laser frappant un cristal de Borate de Baryum, donne naissance à une paire de photons pour 1'000'000'000 photons provenant du laser. Les photons émis, pour respecter les lois de conservation d'énergie et de moment, ont automatiquement des spins opposés. Mais il n'est pas facile de recueillir et de diriger les photons émis. Dans la pratique, les particules à spins intriqués ne sont guère utilisées. Les expériences courantes utilisent souvent des photons intriqués selon leur polarisation, qui permettent des dispositifs expérimentaux relativement faciles à mettre en œuvre. Des expériences actuelles sur la cryptographie quantique ont mis en vogue l'intrication de deux paires de photons qui se différencient par un décalage temporel entre leurs émissions. L'intrication de ces paires est assez stable pour être conservée sur des distances / des durées assez grandes (plusieurs dizaines de mètres / quelques secondes).

### La polarisation

Un faisceau laser est une onde électromagnétique oscillant perpendiculairement à son axe de propagation, dans tous les sens. Un filtre polarisant permet de sélectionner une partie du faisceau, celle qui oscille dans le sens du filtre. Par convention, on utilise le plus souvent les polarisations horizontale et verticale.



Notre protocole naturel ne nous permet pas de fabriquer des paires strictement corrélées, puisqu'il est calqué sur la manière dont les paires de photons se créent dans la nature. Quand les physiciens utilisent des paires de photons dans des expériences où ils mesurent les spins, ils sont, tout comme nous, forcés d'utiliser des particules anticorrélées.

Dans les expériences utilisant des photons intriqués selon leur polarisation, on crée volontiers des paires corrélées. Les résultats sont alors quelquefois plus faciles à interpréter.

Les expériences des 4 premiers chapitres n'utiliseront que des paires anticorrélées, créées selon notre protocole naturel et dont l'intrication est très solide.

## Expérience 9 - *Localité et réalisme*

Bob et Charlie prennent chacun une des deux particules créées dans l'expérience 8. En prenant les précautions nécessaires pour qu'il soit le seul à connaître le résultat, Bob mesure sa particule (fig. 24).

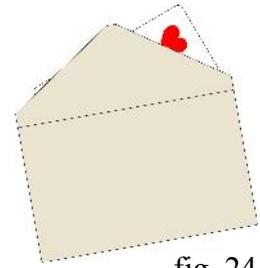


fig. 24

Question:

**Que peut-on dire maintenant de la particule de Charlie?**

Alice: - Si on peut comparer cette expérience avec l'expérience 7, la mesure de Bob a modifié la fonction d'onde de la particule de Charlie. Dans notre cas, puisque nous n'avons que 2 particules, la fonction d'onde de celle de Charlie s'est même effondrée. Elle est maintenant "nette", avec une seule valeur possible, que Bob connaît.

Charlie: - Ma particule n'a pas changé. Je l'ai eue en main tout le temps.

Bob: - Si, elle a changé: avant ma mesure, ta mesure pouvait aussi bien donner *noir* que *rouge*. Maintenant, elle ne peut plus donner qu'un résultat. Je pourrais te prédire lequel, et cette fois sans aucune erreur possible.

Nous rencontrons dans les attitudes de nos expérimentateurs deux concepts qui alimentent les controverses dès la naissance de la mécanique quantique:

### 1) La localité

L'hypothèse de la **localité** refuse tout effet instantané à distance, parce qu'un tel effet violerait les lois élémentaires de la relativité. C'est l'attitude de Charlie.

Dans sa définition la plus stricte, l'hypothèse veut que si une mesure exerce une influence sur une particule extérieure au dispositif de mesure, ça ne peut être qu'à très courte distance et dû à une perturbation causée par le dispositif, et non directement à la valeur de la propriété mesurée.

Dans un variante un peu plus souple, l'hypothèse de la localité admet la possibilité d'une action à distance, mais refuse qu'elle puisse être instantanée - un effet à distance, quelle que soit sa nature, ne pouvant en aucun cas se propager plus vite que la lumière.

Au nom de la localité, on pourrait argumenter: La mesure de Bob n'a aucune influence sur la particule de Charlie. Démonstration: On termine l'expérience en mesurant la particule de Charlie et en notant le résultat (Bob ne divulgue pas le résultat de sa propre mesure). On répète l'expérience une vingtaine de fois et on constate que les résultats des mesures de Charlie se répartissent également entre *rouge* et *noir*, ce qui est la signature habituelle des particules et ne met en évidence aucune influence à distance<sup>24</sup>.

Si on modifie cette dernière expérience en annonçant à chaque fois à Charlie l'issue de la mesure de Bob, on peut à la rigueur parler d'effet à *distance*, mais certainement pas d'effet instantané, parce que l'effet ne modifie l'expérience qu'à l'instant où Charlie reçoit l'information<sup>25</sup>.

24 Rappelons-le: Servez-vous de notre matériel pour faire toutes les expériences que vous voulez!

25 L'argument de la localité peut s'appliquer aussi à notre expérience 7: en examinant le bloc de Charlie, on s'aperçoit qu'il a en effet mesuré (globalement) autant de *rouges* que de *noirs*.

## 2) Le réalisme

L'hypothèse du **réalisme direct** (systématiquement abrégé en **réalisme**) estime qu'il n'est pas nécessaire de faire une mesure pour en connaître le résultat si on peut le déterminer par d'autres moyens. C'est l'attitude de Bob, quand il dit connaître le résultat de la mesure que Charlie n'a pas encore faite.

Dans le cadre de cette expérience, Bob a certainement raison d'affirmer qu'il connaît la valeur de la particule de Charlie. Ce réalisme semble ici raisonnable et plutôt inoffensif. Nous verrons au chapitre 3 que cette attitude est un important sujet de controverse.

Les disputes autour de ces sujets ne sont pas éteintes. Tout au plus admet-on que les expériences réalisées affaiblissent de plus en plus l'hypothèse double *localité et réalisme* et qu'au moins une des deux composantes devra tôt ou tard être abandonnée; mais laquelle?

Pour nos expérimentateurs, l'expérience 9 s'arrête ici.

Il est impossible d'empêcher les lecteurs et lectrices de mesurer la particule qu'ils ont créée à la place de Charlie. Mais avant, qu'ils se posent cette question très importante:

**est-ce bien nécessaire?**

Si cela crée une dispute, tant mieux! C'est que vous avez parfaitement compris le sujet.

## Expérience 10 - Création d'une particule "nette"

Chaque expérimentateur va essayer de créer une particule **rouge**.

Charlie crée une paire intriquée (protocole naturel). Il choisit une particule au hasard et la mesure. Elle est *rouge*. "Voilà, " annonce-t-il. "Celle-ci est rouge". Et il remet la carte dans son enveloppe.

Bob crée lui aussi une paire intriquée. Il mesure une des particules, qui s'avère être *rouge* elle aussi. Il bougonne: "Celle-ci était rouge. Je recommence".

Charlie s'étonne: - Pourquoi veux-tu recommencer?

Bob: - Mais parce que la particule que je viens de mesurer est détruite!

Il répète les mêmes gestes (création d'une paire et mesure d'une particule). Cette fois, la mesure donne *noir*. Bob prend l'autre particule de sa dernière paire et déclare: "Ça, c'est une particule rouge!"

Alice, comme d'habitude, va se montrer plus orthodoxe. Elle examine les cartes créées par les garçons et s'apprête à critiquer Charlie, mais celui-ci prend les devants: "Ne te donne pas cette peine, j'ai compris mon erreur - je n'ai pas le droit de ressusciter une particule morte."

Mais Alice a aussi une remarque à faire à Bob: - J'aurais fait comme toi, mais moi, je n'aurais pas dit que la particule est rouge; j'aurais dit qu'elle sera rouge au moment où on la mesure et seulement si on la mesure. Les particules n'ont jamais de valeurs en elles-mêmes. Au mieux, elles ont une fonction d'onde effondrée qui force le résultat de la mesure.

Alice exagère peut-être un peu, mais son attitude est parfaitement conforme à la tradition quantique - Bob, quant à lui, s'installe de plus en plus dans une vision réaliste.

Les ingénieurs ne sont en général pas aussi dogmatiques qu'Alice. Et comme ils créent des particules presque forcément destinées à être mesurées, ils ne se soucient guère de ces nuances philosophiques.

Quand nous aurons besoin de créer des particules "nettes", nous le ferons ainsi, mais sans oublier les objections possibles.

## Expérience 11 - Téléportation

Voici un sujet particulièrement populaire et souvent récupéré de manière fort discutable par des domaines très éloignés de la science.

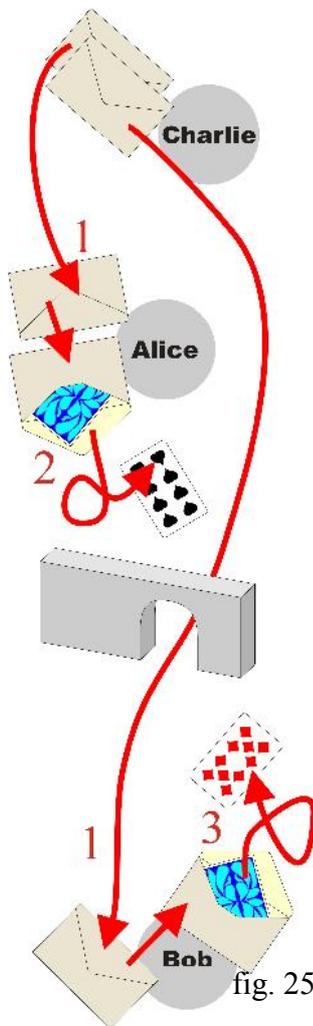


fig. 25

Entrons tout de suite dans le vif du sujet:

Charlie crée une paire intriquée, selon notre protocole naturel. Il donne une particule à Alice et une à Bob.

Alice et Bob s'éloignent le plus possible l'un de l'autre (N'hésitez pas à envoyer votre "Bob" au fond du jardin!).

Alice mesure sa particule et ce faisant provoque l'effondrement de sa fonction d'onde, qui prend une valeur fixe. La fonction d'onde de la particule de Bob, en vertu de la corrélation, s'effondre à son tour pour prendre la valeur inverse de celle mesurée par Alice. Bob peut maintenant mesurer sa particule et prendre connaissance de la propriété "téléportée"<sup>26</sup> (fig. 25).

Le phénomène n'est pas identique à l'effet à distance de l'expérience 7, puisqu'il n'a besoin d'aucune

communication non-quantique entre les expérimentateurs.

Malgré le taux de réussite de 100 % du procédé et son énorme popularité dans la presse de vulgarisation, on se doute bien qu'on est loin d'une application industrielle! D'abord, nous n'avons même pas téléporté une particule, seulement le message (de nature inconnue) qui provoque l'effondrement de la fonction d'onde de la particule que Bob avait déjà en sa possession - mais bon, au moins ça nous l'avons fait. Pourtant, Alice ne peut pas prétendre avoir envoyé une information, parce qu'elle ne peut pas choisir laquelle des deux valeurs possibles elle veut téléporter: la valeur de la mesure faite sur sa propre particule est due au seul hasard.

Bob intervient: - Remarquons que si Alice veut effectivement transmettre une valeur qu'elle déciderait avant d'effectuer sa mesure, la transmission réussirait tout de même une fois sur deux, ce qui n'est pas si mal.

Charlie: - Mais tu ne sais pas quelle fois sur deux; ça nous fait une belle jambe. Et l'autre fois sur deux, c'est systématiquement la valeur inverse qui est transmise. Pour qu'on puisse parler d'un mode de transmission qui fonctionne une fois sur deux, il faudrait que l'échec de transmission se traduise par une valeur aléatoire. Mettons qu'on répète l'expérience un certain nombre de fois et qu'Alice veuille à chaque fois que Bob mesure *noir*. Si la transmission fonctionnait effectivement une fois sur deux, Bob recevrait trois fois plus de *noirs* que de *rouges*: la moitié du total serait *noir* à cause d'une transmission correcte et l'autre moitié com-

### TÉLÉPORTATION

(selon Wikipedia)

On nomme téléportation le transfert d'un corps dans l'espace sans parcours physique des points intermédiaires entre départ et arrivée. Le thème a été traité tant en science-fiction qu'en physique ou en parapsychologie.

### TÉLÉPORTATION QUANTIQUE

(selon Wikipedia)

La téléportation quantique est un protocole de communications quantiques consistant à transférer l'état quantique d'un système vers un autre système similaire et séparé spatialement du premier en mettant à profit l'intrication quantique. Contrairement à ce que le nom laisse entendre, il ne s'agit donc pas de transfert de matière. Le terme de téléportation quantique est utilisé pour souligner le fait que le processus est destructif: à l'issue de la téléportation, le premier système ne sera plus dans le même état qu'initialement.

<sup>26</sup> La valeur mesurée par Bob est bien entendu chaque fois l'inverse de celle mesurée par Alice, en vertu de l'anticorrélation de nos paires intriquées. L'expérience serait plus spectaculaire avec des paires strictement corrélées, puisqu'alors les deux valeurs seraient identiques. Mais nous ne savons pas créer des paires corrélées sans enfreindre les règles de notre modèle.

porterait autant de *noir* que de *rouge*. Dans ce cas, une information serait en effet lisible à l'arrivée. Mais ici, le message reçu est toujours une succession aléatoire de *rouge* et *noir* en quantités égales. Votre effet de téléportation est une illusion!

Alice: - Dans un sens, tu as raison. Mais nous n'avons jamais prétendu transmettre un message. Rappelons-nous l'expérience 7, qui impliquait un système de 4 particules: Bob mesurait une particule, ce qui modifiait la fonction d'onde d'une particule détenue par Charlie. Ici, la mesure faite sur une de deux particules intriquées provoque l'effondrement complet de la fonction d'onde de l'autre. Et ce phénomène, nous l'observons absolument chaque fois que nous faisons cette expérience. Ce qui est transmis n'est pas une information, mais un état quantique. Et comme cette transmission n'implique aucun mécanisme classique de la physique, il s'agit bien de téléportation.

---

A la lumière des connaissances acquises jusqu'ici, comment interprétez-vous le récit suivant?

Un fromager, qui a une échoppe en ville, vend aussi régulièrement sa marchandise au marché, à bord d'une camionnette équipée. Un matin, avant de se rendre au marché, le fromager sort de sa réserve une meule non entamée de Bonfrom. Le fournisseur, en qui notre fromager a toute confiance, y a apposé une étiquette signalant le poids de la meule: 3 kg 735. Dans l'intention de vendre du Bonfrom sur le marché, le commerçant en coupe une tranche. Sa longue expérience et la concentration qu'il met dans l'opération lui permettent d'estimer le poids de la tranche à 600 grammes, avec une précision suffisante pour qu'il soit inutile de procéder à une pesée. La meule entamée est remise au frais.

Voici notre fromager au marché, à 14 km de son échoppe. La tranche de Bonfrom qu'il a emportée n'ayant pas encore été pesée, son poids est indéterminé. La fonction d'onde de ce poids est centrée à 600 g. Estimons que l'habileté du commerçant à la coupe assure une erreur ne dépassant pas 15%. On peut donc considérer que la tranche a en même temps tous les poids possibles entre 510 et 690 grammes ( $600 \text{ g} \pm 15\%$ ), avec une préférence pour la zone centrale.

La meule entamée restée en ville et qui n'a pas été pesée depuis la coupe, est elle aussi dotée d'une fonction d'onde de forme rigoureusement identique à celle de la tranche, mais centrée à 3 kg 135 (3 kg 735 moins 600 g). Son poids est aussi en superposition d'états (valeurs entre 3 kg 045 et 3 kg 225).

Au milieu de la matinée, le fromager a eu de nombreux clients, mais personne ne lui a encore acheté de Bonfrom. Arrive un habitué qui, reconnaissant son fromage préféré, demande au commerçant de lui vendre la tranche entière. Le fromager pèse alors le Bonfrom: 667 grammes. Laissons les personnages à leur transaction et concentrons nous sur ce qui arrive au fromage:

A l'instant de la pesée, la fonction d'onde de la tranche s'effondre: la valeur "floue" de 600 g se fige à 667 g. Aussitôt, en ville, la fonction d'onde de la meule entamée s'effondre, sa valeur "floue" de 3 kg 135 se fige à 3 kg 045. Le poids de la tranche a augmenté de 67 g, tandis que la meule en ville a perdu 67 g. Conclusion: 67 grammes de fromage ont été téléportés instantanément sur une distance de 14 km!

## Expérience 12 - Répétiteur

L'expérience 11 vous a sans doute paru facile, voire triviale. Ceci tient essentiellement au fait que dans notre modèle nous créons des paires de particules faciles à manipuler et dont l'intrication est extrêmement robuste. L'intrication des "vraies" particules (comme les photons) est plus fragile parce qu'il est impossible d'éviter totalement l'influence du milieu extérieur. Pour que la téléportation quantique réussisse, il faut que chacune des particules intriquées puisse être déplacée et conservée en superposition d'états sans modification de sa fonction d'onde. La conservation pose relativement peu de problèmes: une particule, piégée dans des champs magnétiques, peut "tenir" quelques secondes. Le transport est plus délicat: plus la distance est longue, plus la fonction d'onde de la particule risque de se dégrader.

Lors de la transmission non quantique de signaux par voie électromagnétique classique (fils conducteurs ou ondes hertziennes), on compense la déperdition du message en disposant sur la ligne des dispositifs qui régénèrent la puissance et la qualité du signal. Pour augmenter la portée de la téléportation quantique (quelques dizaines de mètres actuellement), il nous faudrait donc l'équivalent d'un de ces *répétiteurs*. C'est le sujet de cette expérience.

**Nous cherchons à mettre au point un dispositif qui nous permettrait de copier une particule intriquée sans modifier sa fonction d'onde ni briser l'anticorrélation qui lie la paire de particules.**

Alice crée une paire de particules intriquées, selon le protocole naturel (voir expérience 8). Elle pose une des deux particules sur la table (fig. 26, A2). Elle demande: "Voilà! Qui peut me copier cette particule?"

Charlie propose: - Nous avons déjà rencontré le problème. C'est simple.

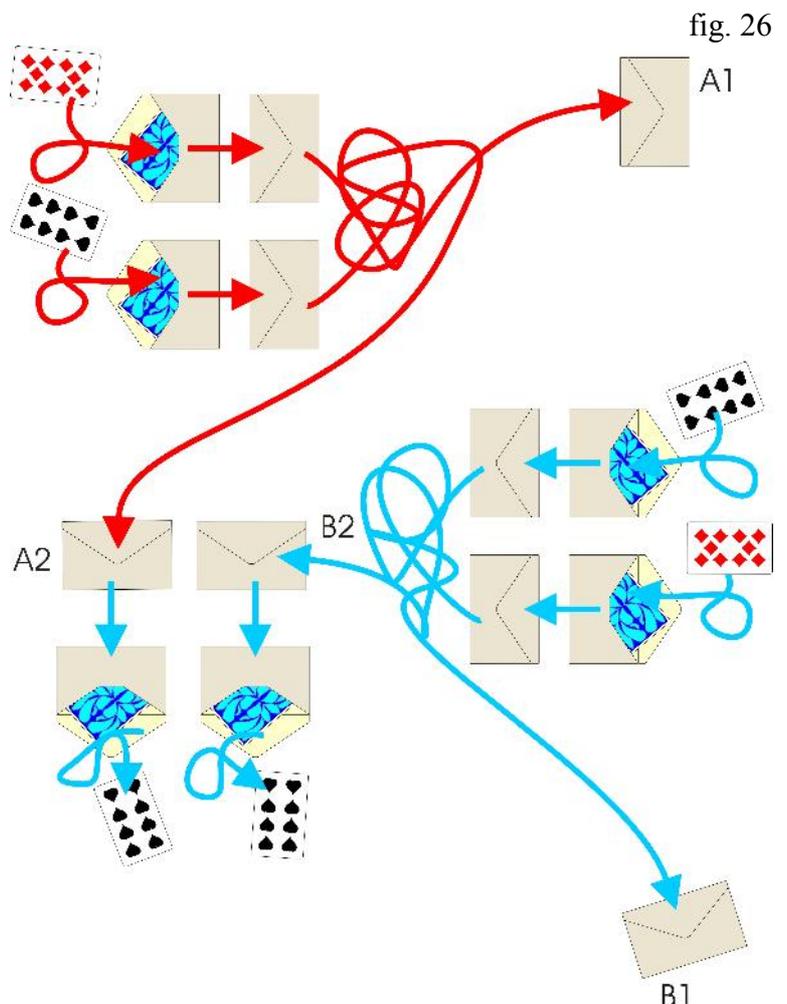
Il prend la particule à copier et la mesure: *noir*. Ensuite, il crée une paire intriquée, selon le protocole naturel, et prend une des deux nouvelles particules (fig. 26, B2). Il explique: Maintenant, je vais mesurer cette particule. Si elle est *noire* (c'est la situation de la fig. 26), je mesure l'autre particule que je viens de fabriquer, juste pour la détruire, et je recommence avec une nouvelle paire corrélée. Si ma mesure donne *rouge*, je considère l'autre particule, celle qui est intacte (fig. 26, B1), comme une copie correcte de la tienne (fig. 26, A2).

Alice: - Ça ne va pas du tout! Si tu mesures la particule à copier, sa fonction d'onde s'effondre! En même temps que celle de l'autre particule de ma paire d'origine!

Bob: - Eh oui! Parce que maintenant, cette particule est *rouge*.

Alice: - Non, elle n'est pas rouge. Elle ne sera *rouge* que quand on la mesurera. Toujours ton réalisme! Allez! On recommence tout.

Elle détruit toutes les particules de l'expérience, crée une nouvelle paire corrélée et pose une des deux particules sur la table.



Charlie: - Et si je fais comme ça?

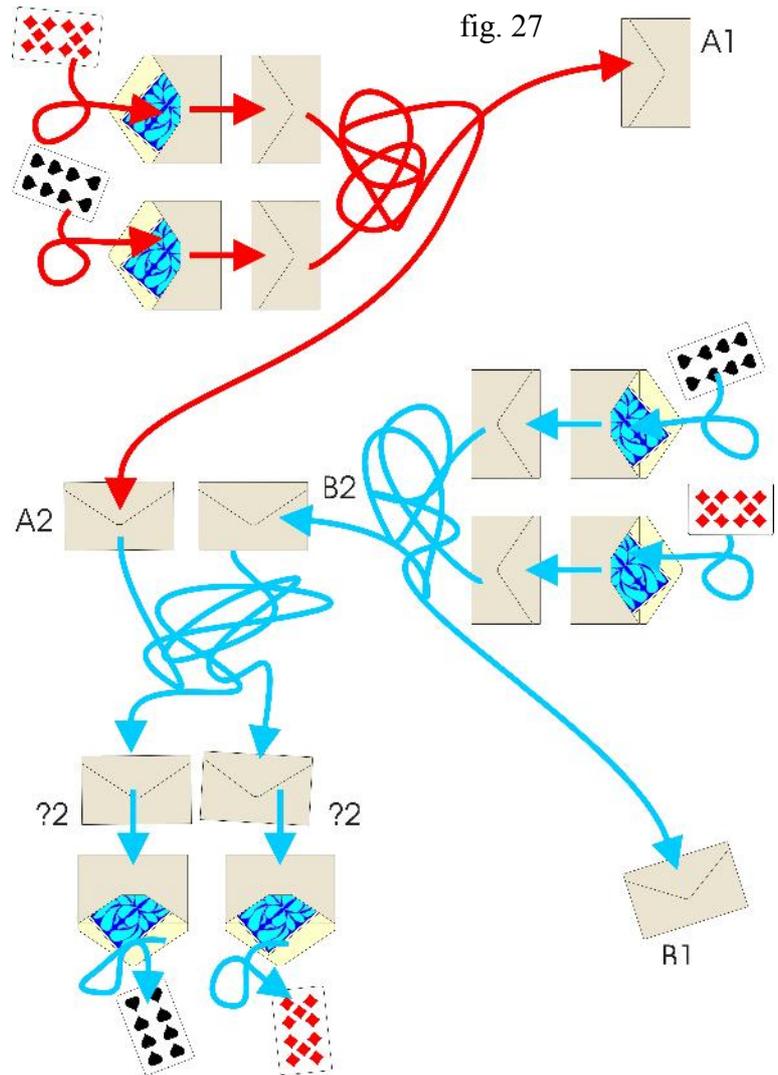
Il crée une paire corrélée et en prend une particule (fig. 27, B2), qu'il pose sur celle d'Alice (fig. 27, A2). Il prend ces deux particules, sans les mesurer, et les mélange soigneusement. Alors seulement, il les mesure. Résultat: une *rouge* et une *noire*. Il désigne la seconde particule de sa paire (qui n'a pas été mesurée) et annonce: Voilà, ça c'est une copie de ta particule!

Bob: - C'est génial! Que la particule à copier soit *noire* ou *rouge*, celle qui reste à la même valeur même si on ignore quelle est cette valeur. La fonction d'onde est intacte et l'intrication est conservée.

Alice: - Je reconnais que c'est futé. Ce qui me chiffonne, c'est que tu mesures ma particule, ce qui devrait provoquer l'effondrement de sa fonction d'onde. Mais tu effectues en même temps et au même endroit une mesure qui donne le résultat opposé. Le fait qu'on ne puisse pas attribuer telle valeur à telle particule semble suffisant pour annuler l'effet de la mesure. J'avoue que je trouve ça très troublant<sup>27</sup>.

Bob: - Le hic c'est que, si les deux particules que tu mesures donnent la même valeur, ta copie échoue.

Alice: - Ça, c'est moins grave. Dans ce cas, il suffit de ne rien transmettre. La moitié des particules est perdue, mais toutes celles qui sont transmises le sont correctement.



Nous allons tester la validité du procédé de Charlie dans l'expérience 14. Mais avant, nous avons un problème plus urgent:

Les plus attentifs parmi vous auront repéré un défaut dans notre expérience. La figure 27, pour illustrer correctement le propos de l'expérience, représente deux "8 de carreau" et deux "6 de pique", ce qui est un truquage manifeste! En pratique, les deux cartes rouges sont très probablement différentes; si on n'utilise qu'un jeu de cartes, elles sont même différentes à tous les coups (La même remarque vaut pour les cartes

27 Voilà un exemple typique d'un sujet de dispute entre physiciens.

Pour les plus puristes, la manipulation de Charlie (dans la seconde partie de l'expérience) est manifestement une interaction avec la particule. Puisque A2 et B2 ont été mesurées, avec un résultat parfaitement visible, elles ne peuvent évidemment plus être en superposition d'états. Et en vertu de l'anticorrélation qui lie les particules de chaque paire, A1 et B1 sont désormais des particules "nettes".

Du point de vue mathématique, on peut se montrer plus souple: Vu que la double mesure A2;B2 résulte en deux valeurs complémentaires, on peut estimer que le résultat est en même temps celui de la double mesure B2;A2 (*rouge* et *noir* sont intervertis - ce qui n'influence pas la mesure, puisque toutes les précautions ont été prises pour qu'on ne puisse pas distinguer A2 de B2). Dans ce cas, A2 et B2 sont anticorrélées et leur fonction d'onde est intacte. Par conséquent, A1 et B1 sont anticorrélées elles aussi, avec leur fonction d'onde intacte.

noires). Autant Alice que Charlie peuvent facilement se souvenir des cartes qu'ils ont utilisées pour créer leurs paires de particules. La double mesure de Charlie ne présente plus l'ambiguïté introduite par le mélange des particules A2 et B2 avant la mesure (mélange qui dans ce cas... ne mélange rien du tout!). Les valeurs de A1 et B1 peuvent facilement être déduites et leurs fonctions d'onde s'effondrent. Même si notre modèle, jusqu'ici, n'a jamais fait de différence entre un valet de cœur et un 8 de carreau et même si le souvenir qu'Alice ou Charlie ont des cartes utilisées concerne des grandeurs qui ne font pas partie de notre modèle! C'est un exemple parfait d'une *variable cachée*. En effet, pour que l'expérience fonctionne, nous sommes obligés de ne pas tenir compte de certaines caractéristiques des cartes, caractéristiques pourtant clairement visibles. Et du coup, notre modèle est, comme aurait dit Einstein, incomplet.

Qu'en pensent nos expérimentateurs?

Charlie - Ça confirme ce que je dis depuis le début: Tant qu'on fait semblant de croire que les cartes cli-gnotent ou vibrent ou je ne sais quoi, vos tours de passe-passe sont très amusants. Mais si on fait très attention, on s'aperçoit de la supercherie!

Alice - Il fallait bien tôt ou tard que notre modèle montre ses limites. Je suis prête à croire que, traduit dans un dispositif qui mettrait en scène de *vraies* particules, le répéteur de Charlie fonctionnerait. Jusqu'ici, le modèle a été très efficace: Mon imagination a toujours pu projeter sur nos "particules" les propriétés de superpositions d'états qu'elles représentaient. Mais nous devons nous rendre à l'évidence: la superposition d'états ne se fabrique pas en tirant des cartes.

Bob - Moi, je trouve que notre dernière expérience est loin d'être ratée: la faute que nous avons commise au début de l'expérience a eu un effet que notre modèle pouvait prédire. Et c'est parfaitement réparable.

Alice - Et tu as un remède?

Charlie - Regarde son sourire en coin! Allez, Bob. Raconte!

### Expérience 13 - Paires intriquées sans variables cachées

Ainsi que Bob l'a compris, le défaut de l'expérience 12 peut être corrigé. En créant des paires intriquées selon le protocole qui suit, nous permettons à la double mesure de Charlie d'être ambiguë, comme nous le souhaitons.

Pour éviter que le dos des cartes introduise une variable incontrôlable, nous ne nous servons que d'un seul jeu de 52 cartes.

Alice sépare les cartes *noires* des *rouges* (fig. 28 - 1).

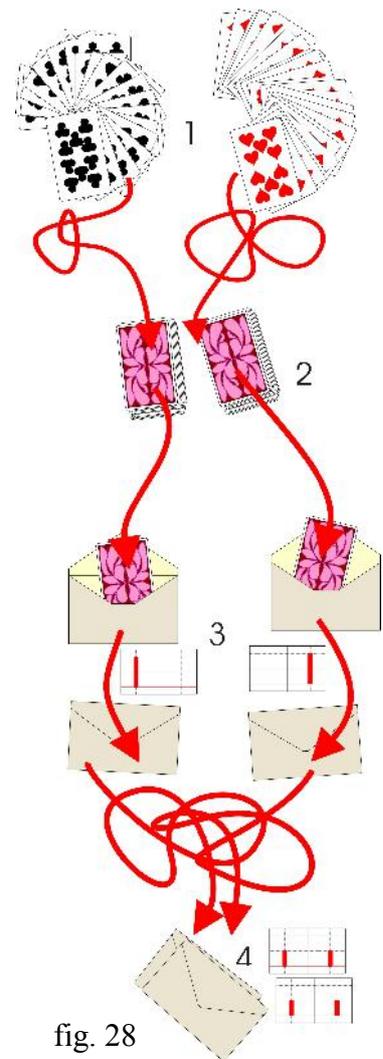
Bob mélange les 26 cartes *noires* et en forme une pile, qu'il pose sur la table, faces cachées.

Charlie fait de même avec les cartes *rouges* et pose sa pile à côté de celle de Bob (fig. 28 - 2).

Pour former une paire intriquée, on mettra dans une enveloppe une carte d'une pile et dans une seconde enveloppe une carte de l'autre pile (fig. 28 - 3). Les enveloppes seront ensuite mélangées (fig. 28 - 4).

L'expérience 12 peut maintenant être refaite avec ce protocole corrigé. La double mesure de Charlie ne permet plus de déterminer l'origine d'une carte, et la particule est correctement copiée (une fois sur deux, s'entend).

**Pour le reste du chapitre, nous utiliserons toujours ce nouveau procédé pour créer une paire de particules intriquées.**



## Expérience 14 - Cryptographie quantique

La téléportation quantique, telle que nous l'avons pratiquée dans l'expérience 11, peut nous sembler parfaitement inutile. Cette technique trouve pourtant une application dans le domaine de la cryptographie.

Dans notre expérience, Alice va envoyer à Bob un message de 7 signes binaires (comme par exemple: 1000100). Toutes les paires intriquées seront créées selon le protocole de l'expérience 13.

Alice, dans un premier temps, envoie à Bob une **clé**, par voie quantique. Pour animer l'expérience, Charlie va manipuler le répéteur de sa conception.

Alice crée une paire intriquée. Elle conserve une particule et passe l'autre à Charlie, qui la copie selon le second protocole de l'expérience 12. Si la copie réussit (c'est-à-dire que sa double mesure fait apparaître une carte de chaque teinte), il passe la copie à Bob. Si la copie échoue, Charlie détruit la particule qui lui reste. Quand Bob annonce à Alice qu'il a réceptionné une particule, chacun mesure sa particule et note le résultat: Alice note 0 pour *rouge* et 1 pour *noir*; Bob, à l'inverse, note 0 pour *noir* et 1 pour *rouge*. Si Bob ne reçoit pas sa particule, Alice détruit la sienne.

On répète le processus jusqu'à ce que 7 signes aient été transmis. En raison de l'anticorrélation qui lie les particules de chaque paire, Alice et Bob sont maintenant en possession de la même clé. On note que les manipulations de Charlie ne lui ont donné aucune indication sur la clé.

Disons pour l'exemple que la clé est: **0110010**.

Alice compose maintenant le **message** de 7 signes binaires qu'elle veut faire passer à Bob: **1000100**.

### Transmission du message:

Alice compare chaque signe de son message au signe de même position dans la clé:

message:	1	0	0	0	1	0	0
clé (chez Alice):	0	1	1	0	0	1	0
Comparaison:	différents	différents	différents	identiques	différents	différents	identiques

Alice peut maintenant indiquer à Bob le résultat de chaque comparaison. Bob se munit de sa clé et la copie, en conservant le même signe chaque fois qu'Alice lui annonce "identique" et en changeant le signe quand Alice lui annonce "différent".

clé (chez Bob)	0	1	1	0	0	1	0
annonce d'Alice	différents	différents	différents	identiques	différents	différents	identiques
message	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Quand Alice indique à Bob s'il faut ou non changer le signe de la clé, elle peut le faire *publiquement*. Sans la clé, le message codé apparaît comme une suite aléatoire de "identique" et "différent".

La **cryptographie** (selon WIKIPEDIA) est une des disciplines de la cryptologie s'attachant à protéger des messages (assurant *confidentialité*, *authenticité* et *intégrité*) en s'aidant souvent de *secrets* ou *clés*.

La **cryptographie quantique** (selon WIKIPEDIA) est une tentative de mise en œuvre des prédicats de la mécanique quantique afin d'assurer la confidentialité, l'intégrité et/ou la non-interception de transmissions de données.

On remarque que Charlie aurait pu intercepter la clé s'il avait copié les particules selon le premier protocole proposé dans l'expérience 12. Pour donner le change à Alice et Bob, il lui aurait suffi de faire semblant de rater la copie une fois sur deux (aléatoirement). En possession de la clé, Charlie aurait alors facilement décrypté le message. Nous verrons au chapitre 3 une méthode de cryptographie quantique plus sûre.

## Expérience 15 - Cohérence et décohérence

Alice crée une paire de particules intriquées. Elle donne une particule à Charlie et une particule à Bob.

Bob mesure sa particule, ce qui provoque l'effondrement de la fonction d'onde de la particule de Charlie. Celle-ci est maintenant nette.

Nos expérimentateurs font 8 fois de suite cette même séquence de manipulations. Bob et Charlie classent leurs particules dans l'ordre de leur réception.

Charlie a ainsi 8 particules nettes et Bob a une série de mesures qui lui permet de connaître à l'avance le résultat qu'obtiendrait Charlie en mesurant chacune de ses particules.

Mais Charlie, maintenant, mélange ses particules.

On constate que Bob ne peut plus faire aucune prédiction précise quant à une mesure de Charlie. Quelle que soit la tentative de prédiction de Bob, la mesure d'une particule de Charlie donne un résultat aléatoire conforme à la fonction d'onde de base (autant de chances pour *rouge* que pour *noir*). La seule anticorrélation intacte est liée à la proportion (sur la série entière) de *rouge* et de *noir*<sup>28</sup> ; pour briser cette anticorrélation, il aurait fallu mélanger la série de particules de Charlie avec une autre série (formée de particules nettes ou non).

La série de mesures de Bob et la série de mesures potentielles<sup>29</sup> de Charlie étaient, avant le mélange, **cohérentes**. Après le mélange de Charlie, toutes ses particules sont **floues**.

La cohérence est extrêmement fragile. Il est inutile que Charlie mélange beaucoup ses particules. On pourrait refaire la même expérience où Charlie, au lieu de mélanger les particules, se contenterait de faire passer la particule de dessus sous les autres. En comparant alors les deux séries de mesures de Bob et de Charlie, on constaterait qu'une fois sur deux l'anticorrélation ne se vérifie pas, ce qui correspond au même taux que dans le cas d'un mélange soigneux ou même dans le cas du remplacement de toutes les particules de la série par des particules isolées créées par notre protocole naturel.

Comme nous l'avons déjà remarqué, nos paires de particules jouissent d'une anticorrélation particulièrement robuste. Pourtant, il a suffi d'une intervention mineure pour briser leur intrication<sup>30</sup>. On comprend que les expériences sur de "vraies" particules demandent une préparation minutieuse à l'extrême et ne donnent pas systématiquement des résultats immédiatement lisibles. Il faut quelquefois répéter l'expérience un grand nombre de fois et traiter statistiquement les mesures pour mettre en évidence un phénomène prédit par une théorie.

---

28 Il s'agit en effet d'anticorrélation: une majorité de *rouge* dans la série de Bob implique une minorité de *rouge* chez Charlie.

29 Faut-il rappeler qu'une particule n'a pas de valeur tant qu'elle n'est pas mesurée?

30 Dans certaines expériences impliquant de "vraies" particules, on a parfois recours à un *décohéreur*. Il s'agit d'un dispositif où les particules sont momentanément piégées et mélangées avant d'être relâchées.

## Chapitre 3

### La double intrication

A l'issue de notre expérience 3, nous avons brièvement évoqué, dans une note en bas de page, les **relations d'incertitude** formulées par Werner Heisenberg. Ces relations interdisent notamment d'attribuer simultanément des valeurs précises aux deux grandeurs que sont la *vitesse* et la *position* d'une particule. Pour l'instant, nous ne pouvons pas nous servir de nos particules pour illustrer ce principe, parce qu'elles n'ont qu'une seule **dimension** (la teinte).

Tout le chapitre 3 concerne des particules à deux dimensions. Il nous faut donc enrichir notre modèle.

#### Expérience 16 - Création de paires à double intrication

Nous connaissons une dimension de nos particules: la **teinte**, avec ses deux valeurs possibles (*rouge* ou *noir*). La seconde dimension que nous allons considérer, nous l'avons déjà remarquée sans l'avoir jamais mesurée, c'est le **dos**. Dans le cadre de notre atelier, nous appellerons par convention *bleu* et *rose* les deux valeurs possible du dos. Selon le matériel que vous utilisez, il sera éventuellement plus commode de leur trouver vos propres appellations.

La pratique (fig. 29):

1) Bob prend le jeu de cartes à dos *bleu*. Il sépare les *rouges* et les *noires* en deux piles.

2) Charlie fait de même avec le jeu de cartes à dos *rose*.

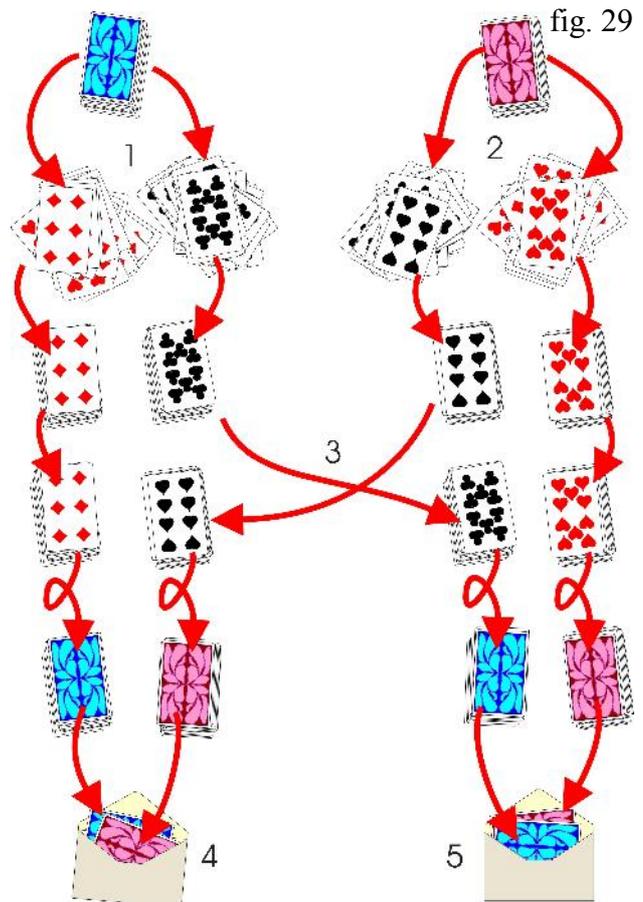
3) Bob et Charlie échangent leurs piles de cartes *noires*. Bob a donc maintenant une pile *bleu;rouge* et une pile *rose;noir*. Charlie a une pile *bleu;noir* et une pile *rose;rouge*.

4) Bob prend une carte de chacune de ses piles et les met dans une même enveloppe, en prenant bien soin d'en placer le dos du côté du rabat. **Notez bien que, ce faisant, il ne crée pas une particule. L'enveloppe n'est ici qu'un outil.** Il passe cette enveloppe à Alice.

5) Charlie fait de même en prenant deux cartes de ses piles.

6) Bob et Charlie répètent ce processus jusqu'à épuiser leurs piles.

7) A tour de rôle, chacun des 3 expérimentateurs mélange les 52 enveloppes<sup>31</sup> tandis que les deux autres lui tournent le dos.



31 La moitié des enveloppes est ainsi utilisée. Si vous disposez de moins de 104 enveloppes, il faut réaliser l'expérience avec moins de cartes, mais en veillant à utiliser exactement le même nombre de *bleu;rouge*, de *bleu;noir*, de *rose;rouge* et de *rose;noir*!

8) Les enveloppes garnies sont empilées au milieu de la table. A côté, on empile autant d'enveloppes vides. Jusqu'à épuisement du matériel, chaque expérimentateur va créer des paires selon le protocole suivant (fig. 30):

Il prend une enveloppe garnie et une enveloppe vide. Il ouvre l'enveloppe garnie et, en prenant soin de garder caché le recto des cartes (le côté *teinte*), il transfère une carte dans l'enveloppe vide, là aussi le dos du côté du rabat. Il ferme les deux enveloppes contenant maintenant chacune une carte et mélange ces enveloppes. Les paires ainsi formées sont confiées à Alice, qui les dispose de manière à ce que les paires ne se mélangent pas (fig. 31).

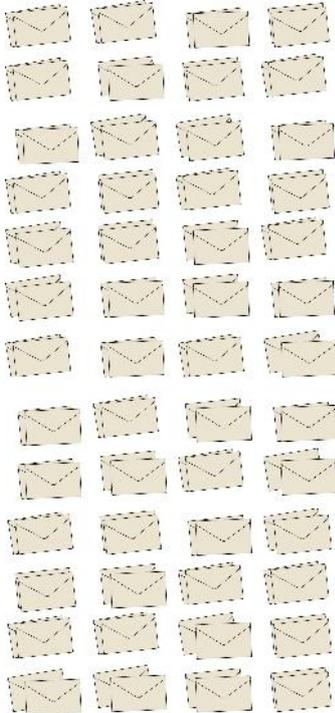


fig. 31

Chaque paire ainsi créée est intriquée exactement comme les paires de l'expérience 13. De plus, les valeurs des *dos* sont intriquées elles aussi, par un mécanisme parfaitement similaire: si on attribue à *bleu* la valeur  $-1$  et à *rose* la valeur  $+1$ , on observe une anticorrélation.

Ce travail de fabrication a été fastidieux, mais notre réserve de paires à double intrication devrait nous suffire à réaliser les expériences de tout le chapitre.

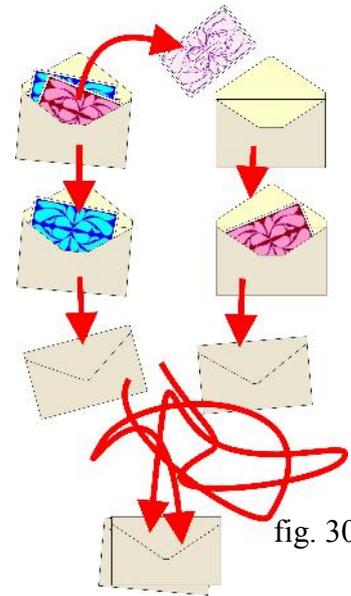


fig. 30

## Expérience 17 - *On ne mesure qu'une fois*

Nous allons continuer de mesurer nos particules comme nous l'avons toujours fait. Dans le cas d'une particule à deux dimensions, nous devons toutefois être très rigoureux.

### Règle absolue:

Pour mesurer la *teinte*, on tient l'enveloppe côté "adresse" vers soi avant de sortir la carte (fig. 31).

Pour mesurer le *dos*, on tient l'enveloppe côté rabat vers soi avant de sortir la carte (fig. 32).

On sort la carte de l'enveloppe de manière à maintenir impérativement caché à tous le côté qu'on ne mesure pas.

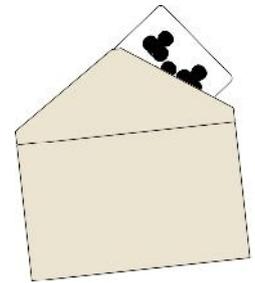


fig. 31

Ce protocole reproduit ce qui se passe avec les "vraies" particules à intrication double: puisque la mesure détruit la particule, une seule mesure est possible. La valeur de la dimension non mesurée est perdue.

Pour éviter une lecture accidentelle du côté caché, on remet la carte dans l'enveloppe et on met l'enveloppe fermée sur une pile à l'écart, hors du champ des expériences. Les enveloppes écartées ne seront plus utilisées avant le chapitre 4<sup>32</sup>.

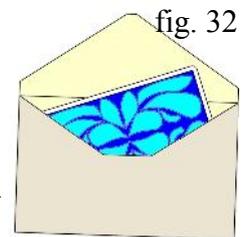


fig. 32

---

### L'expérience:

Alice prend une des paires préparées dans l'expérience 16. Elle donne une des particules à Bob et l'autre à Charlie.

Bob choisit s'il veut mesurer la *teinte* ou le *dos*. Puis il effectue cette mesure. Admettons qu'il mesure le *dos* et qu'il obtienne *rose*.

### Questions:

**Qu'est-il arrivé à la dimension *teinte* de sa particule? Et que devient la particule de Charlie?**

#### Opinion de Charlie

Nous savons à coup sûr que ma particule est *bleue*. Nous ignorons la *teinte* de la particule de Bob parce que nous nous interdisons de mesurer les deux dimensions de la particule. Donc, tout ce qu'on peut dire de ma particule, c'est qu'elle est *rouge* ou *noire*, à chances égales.

#### Opinion de Bob

La particule de Charlie est *bleue*. C'est un fait, parce que ma mesure a forcé cette valeur en vertu de l'anticorrélation des particules. Mais les *teintes* étaient elles aussi anticorrélées. La fonction d'onde "teinte" de la particule de Charlie a été modifiée, bien que je ne voie pas comment le représenter sur un diagramme... Je m'explique: Avant ma mesure, j'avais la possibilité de connaître la valeur *teinte* de la particule de Charlie - après ma mesure, je ne le peux plus. C'est peut-être une manifestation des relations d'incertitude d'Heisenberg: Ma mesure a augmenté ma connaissance du *dos* de la particule de Charlie, mais en échange j'ai augmenté mon ignorance de la *teinte* de cette même particule.

#### Opinion d'Alice

Concernant le *dos* de la particule de Charlie, la situation est claire: Je sais que vous voyez ça comme une co-

---

32 Si un manque d'enveloppes ne vous a pas permis de créer 52 paires intriquées lors de l'expérience 16, votre réserve sera peut-être un peu maigre quand vous entamerez l'expérience 20. Dans ce cas, vous pourrez alors recycler les enveloppes mises au rebut pour reformer des paires à double intrication, selon le protocole de l'expérience 16.

quetterie, mais je ne peux pas considérer la particule comme *bleue* avant la mesure. Je dirai donc que **si** Charlie mesure le *dos* de sa particule, il obtiendra *bleu*. En ce qui concerne la *teinte*, je suis plutôt perplexe. Je vois deux hypothèses, mais elles sont contradictoires...

Première hypothèse: Comme la particule de Bob a été détruite, la dimension *teinte* de la particule de Charlie est en superposition d'états, comme une particule isolée créée selon le protocole naturel que nous avons rencontré dans l'expérience 8. Par rapport à la *teinte*, la particule de Charlie est donc **floue**.

Seconde hypothèse: Tant que les deux particules existaient, les deux dimensions *teinte* et *dos* en étaient anti-corrélées et donc en superposition d'états. Charlie aurait pu mesurer la *teinte* de sa particule et provoquer l'effondrement de la fonction d'onde de celle de Bob. Mais la mesure de Bob a détruit sa particule et une particule détruite n'a plus de dimension *teinte* qui puisse être en superposition d'états! Par conséquent, en vertu de l'intrication, la dimension *teinte* de la particule de Charlie ne peut pas être non plus en superposition d'états. Et si elle n'est pas en superposition d'états, elle est par définition **nette**.

Voilà un joli paradoxe! Nous verrons lors de l'expérience 21 que cette notion de particule "nette ou floue" n'est pas toujours... nette.
--

Maintenant, Charlie mesure le *dos* de sa particule. Il obtient *bleu*, comme tout le monde s'y attendait. Nos trois expérimentateurs sont d'accord pour estimer que maintenant, plus rien ne peut être dit au sujet de la dimension *teinte* des deux particules de l'expérience.

Bien entendu, tout le monde se demande: "Que serait-il arrivé si Charlie avait mesuré la <i>teinte</i> de sa carte?". La question est assez importante pour qu'elle soit le sujet des deux prochaines expériences.
--

## Expérience 18 - Le paradoxe E.P.R.

Comme nous l'avons évoqué à l'issue de notre expérience 3, Certains physiciens (dont Einstein) considéraient que les *relations d'incertitude* formulées par Heisenberg n'étaient qu'un traitement statistique de processus individuels qui obéissaient en réalité aux lois classiques de la physique. En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen proposent une **expérience de pensée** qui est devenue un classique sous le nom de **paradoxe E.P.R.** Illustrons par l'expérience le raisonnement de ces trois auteurs:

Alice prend une paire de la réserve préparée dans l'expérience 16. Elle donne une particule à Bob et une particule à Charlie.

Bob et Charlie se préparent à mesurer chacun sa particule. Bob mesurera la *teinte* et Charlie mesurera le *dos*. Pour que les deux mesures se fassent en même temps, Alice les synchronise par un compte à rebours. A zéro, les deux garçons font leur mesure (en prenant bien garde de ne pas laisser apparaître la dimension non mesurée). Observons le résultat (on suppose que Bob obtient *noir* et que Charlie obtient *bleu*):

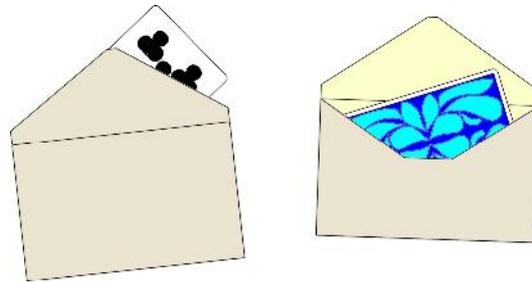


fig. 33

### Opinion de Charlie

Une mesure sur une particule donne automatiquement la valeur inverse sur l'autre. La particule de Bob est donc *rose;noir* et la mienne est *bleu;rouge*. Il n'y a rien de mystérieux là-dedans!

Et voilà bien le paradoxe: Selon Heisenberg, la connaissance de la valeur d'une dimension d'une particule devrait automatiquement entraîner l'ignorance de la dimension non mesurée. Or ici, nous connaissons avec certitude les 4 valeurs impliquées dans l'expérience. Pire: les 4 valeurs ont été obtenues en ne faisant que 2 mesures!

### Opinion de Bob

Si j'avais mesuré la *teinte* de ma particule avant que Charlie effectue sa mesure, on aurait pu affirmer que s'il avait plus tard mesuré lui aussi la *teinte* de sa particule, le résultat aurait donné *rouge*. Mais une mesure que je fais sur la **teinte** de ma particule ne peut pas influencer une mesure que Charlie fait plus tard sur le **dos** de sa particule. Un raisonnement symétrique peut être fait sur la mesure de Charlie. Chacun de nous a donc fait une mesure qui **ne pouvait pas** avoir d'effet à distance sur la mesure de l'autre. Et s'il n'y a pas d'effet à distance, c'est que les deux particules possédaient **avant les mesures** les valeurs mises en évidence par l'expérience. Ce qui démontre que la superposition d'états n'est pas une propriété de la matière, mais "seulement" l'expression mathématiquement correcte de l'inévitable ignorance que nous avons de l'état précis d'une particule. De toute manière, peu importe mon opinion; notre expérience contredit visiblement les relations d'incertitude.

L'opinion de Bob est tout à fait dans l'esprit du groupe Einstein-Podolsky-Rosen.

### Opinion d'Alice

Les relations d'incertitude ne sont justement pas contredites! Ce sont vos conclusions qui sont hâtives. La particule de Bob est *noire*, soit. Mais il est absurde d'affirmer qu'elle est *rose*! Elle n'aurait été *rose* que si on avait mesuré son *dos*; ce que notre dispositif interdit, puisque la particule est détruite précisément au mo-

ment où on mesure la *teinte*! Notre expérience est donc, contrairement à ce que vous dites, parfaitement en accord avec les relations d'incertitude. Aucune valeur ne peut être attribuée au *dos* de la particule de Bob. De manière similaire, aucune valeur ne peut être attribuée à la *teinte* de la particule de Charlie.

Les arguments présentés par Alice sont similaires à ceux avancés par Niels Bohr en réponse à la publication du paradoxe E.P.R.

---

Les attitudes d'Alice et de Bob ne sont pas si incompatibles qu'il peut paraître. Si Bob pousse son analyse un peu plus loin, il constatera qu'il lui est en effet impossible de démontrer **par l'expérience** la valeur *rose* de sa particule ou la valeur *rouge* de la particule de Charlie. En effet, si Bob avait mesuré le *dos* de sa particule et Charlie la *teinte* de la sienne, ils auraient parfaitement pu obtenir comme résultats respectifs *bleu* et *noir*. Les relations d'incertitude sont en effet respectées dans cette expérience, même si on considère, comme Bob, que la superposition d'états n'est qu'une notion statistique et non un réel comportement intime de la matière.

---

Les tenants de l'hypothèse de la **localité** ont une troisième interprétation: Avant les mesures de Bob et de Charlie, les deux particules ont une fonction d'onde intacte. Chacun fait sa mesure sans que celle-ci ait la moindre influence sur la mesure de l'autre. Il est assez remarquable que dans le cas du paradoxe E.P.R. l'argument est parfaitement recevable, alors que dans le cas où la même dimension est mesurée sur chaque particule d'une paire intriquée, l'hypothèse de la localité est mise à mal à la fois par la vision *réaliste* et par le courant orthodoxe de la mécanique quantique.

## Expérience 19 - Relations d'incertitude

Dans l'expérience 18, nous avons observé une manifestation extrême des *relations d'incertitude*. En effet, comme l'expérience n'impliquait qu'une seule paire intriquée, une mesure quelconque provoquait nécessairement l'effondrement d'une fonction d'onde (celle de la *teinte* ou celle du *dos*, selon la dimension mesurée). Mais les relations d'incertitude peuvent se manifester de façon plus subtile quand des mesures sont faites sur un ensemble cohérent<sup>33</sup> de plusieurs particules.

Quand plusieurs dimensions peuvent être mesurées, l'expérimentateur doit choisir ses priorités, puisque chaque mesure effectuée selon une dimension le prive de la connaissance de toute autre dimension. Voyons cela en pratique:

Alice prélève dans sa réserve 3 paires à intrication double. Elle mélange les 6 cartes, puis en donne 3 à Bob et 3 à Charlie.

Les fonctions d'onde de chacune de ces 6 cartes sont identiques. Représentons-les sous la forme de nos diagrammes (fig. 34).

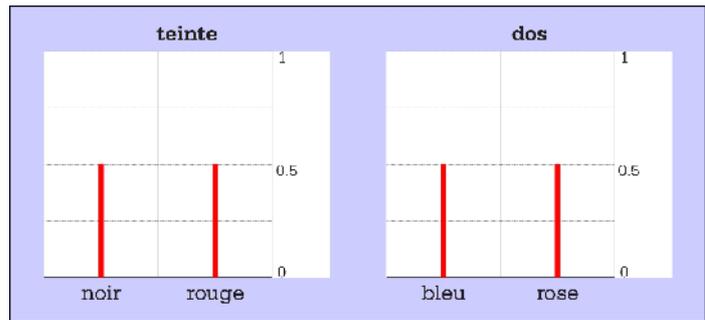
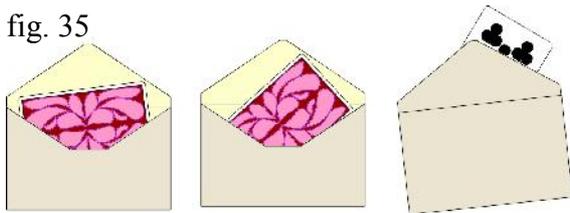


fig. 34

Maintenant, Bob mesure ses trois cartes, en mesurant le *dos* de 2 cartes et la *teinte* de la troisième.

fig. 35



Question:

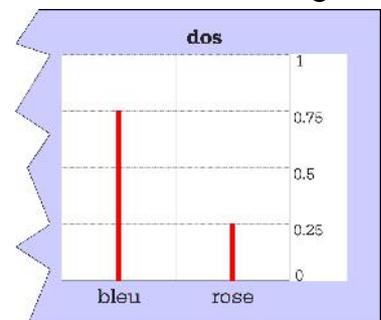
**Que deviennent les fonctions d'onde des cartes de Charlie?**

Deux cas peuvent se présenter:

fig. 36

1) Les mesures des *dos* donnent la même valeur. Dans notre exemple: *rose* (fig. 35).

Chacune des 4 cartes dont on n'a pas mesuré le *dos* (les 3 cartes de Charlie et la carte de Bob dont il a mesuré la *teinte*) est représentative d'un groupe de cartes comprenant 1 carte *rose* et 3 cartes *bleues*. Le diagramme correspondant à la fonction d'onde d'une carte de Charlie est donc celui de la fig. 36.



2) Les mesures des *dos* donnent des valeurs différentes (fig. 37).

Chacune des 4 cartes dont on n'a pas mesuré le *dos* est représentative d'un groupe de cartes comprenant 2 cartes *roses* et 2 cartes *bleues*. Le diagramme correspondant à la fonction d'onde d'une carte de Charlie est donc celui de la fig. 38.

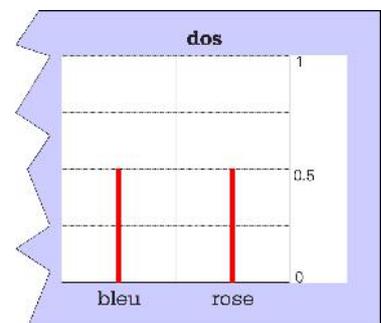


fig. 38

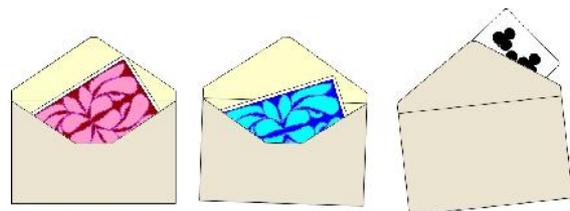


fig. 37

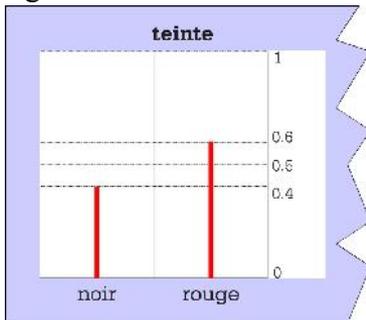
Dans le premier cas, on peut faire un pari raisonnable sur la valeur du *dos* d'une particule de Charlie. On a donc amélioré la connaissance qu'on a de cette valeur. Dans le second cas, les 2 mesures "dos"

<sup>33</sup> On considère ici comme cohérent un ensemble de particules dont on connaît des particularités globales. Dans notre exemple, des contraintes concernant la composition d'un groupe de particules.

de Bob n'ont pas modifié cette connaissance. Le fait pour Bob de mesurer 2 *dos* améliore tout de même, en moyenne, sa connaissance de la valeur du *dos* d'une particule de Charlie. Les deux cas pouvant se présenter avec une même probabilité, la fonction d'onde "moyenne" d'une particule de Charlie (à la suite des mesures de Bob) peut se représenter par le diagramme de la fig. 39.

Le cas de la *teinte* est plus facile à traiter, car on n'a pas à distinguer deux cas. Chacune des 5 cartes dont on n'a pas mesuré la *teinte* (les 3 cartes de Charlie et les 2 cartes de Bob dont il a mesuré le *dos*) est représentative d'un groupe de cartes comprenant 2 cartes *noires* et 3 cartes *rouges* (dans notre exemple). Le diagramme correspondant à la fonction d'onde d'une carte de Charlie est donc celui de la fig. 40.

fig. 40



Plus les valeurs exprimées sur nos diagrammes s'écartent de 0.5, meilleure est notre connaissance de la dimension concernée. Un couple (1 ; 0) ou (0 ; 1) représente une certitude absolue: une fonction d'onde effondrée. Les mesures de Bob ont donc (globalement au moins) tendance à privilégier sa connaissance du *dos* d'une carte de Charlie au détriment de sa connaissance de la *teinte*.

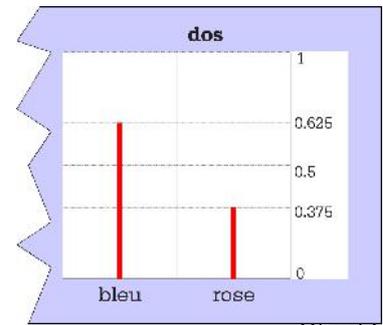
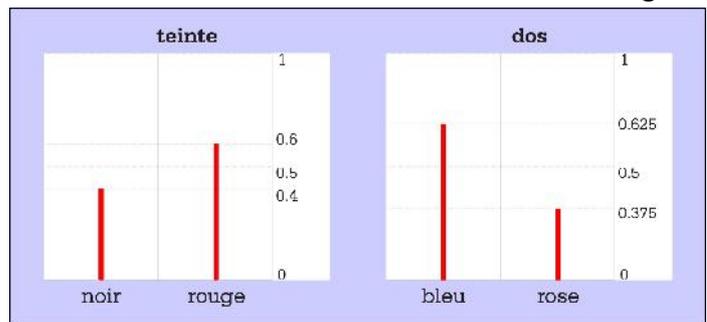


fig. 41

La différence entre les diagrammes représentant les 2 dimensions d'une particule de Charlie n'est pas considérable (fig. 41). Mais le but de l'expérience est justement de montrer que les relations d'incertitude peuvent se manifester avec plus de subtilité que dans le paradoxe E.P.R.



## Expérience 20 - Cryptographie quantique sécurisée

Terminons le chapitre consacré à la double intrication par une expérience plus ludique que les trois précédentes...

Pour réaliser l'expérience, nous aurons besoin d'au moins 25 paires à double corrélation. Si la réserve d'Alice est insuffisante, les enveloppes mises au rebut dans les 3 dernières expériences seront converties en paires à double intrication (selon le protocole de l'expérience 16) et ajoutées à la réserve d'Alice.

**But de l'expérience: Alice transmet un message à Bob, en se servant d'une voie quantique de communication. Charlie tente d'intercepter la communication et donc de lire le message.**

Pour cette expérience, nous allons affecter à nos dimensions les valeurs conventionnelles que nous avons déjà utilisées, à savoir la valeur **-1** à *noir* et à *bleu* et la valeur **+1** à *rouge* et à *rose*.

### Préparation de l'expérience.

1) Charlie prend deux gros tiers des paires intriquées à la réserve d'Alice et les place devant lui, en veillant lui aussi à garder ensemble les 2 particules d'une même paire ( si les deux jeux ont été utilisés, il reste 47 paires - Charlie en prend 35) . Il prépare aussi un bloc où il notera le message intercepté.

2) Alice prépare un message, formé d'un certain nombre de valeurs binaires (-1 ou +1). Le nombre de signes doit être égal à 2 tiers ou moins du nombre de paires dans la réserve d'Alice. Si toutes les cartes sont utilisées, le message sera ainsi de 8 signes.

3) Bob prépare un bloc, sur lequel il notera le message entrant.

Pour une mise en scène efficace, il est conseillé de placer les expérimentateurs de manière à ce qu'aucun ne voie les actions des autres... en espérant que Charlie ne triche pas, ce qui m'énervait beaucoup!

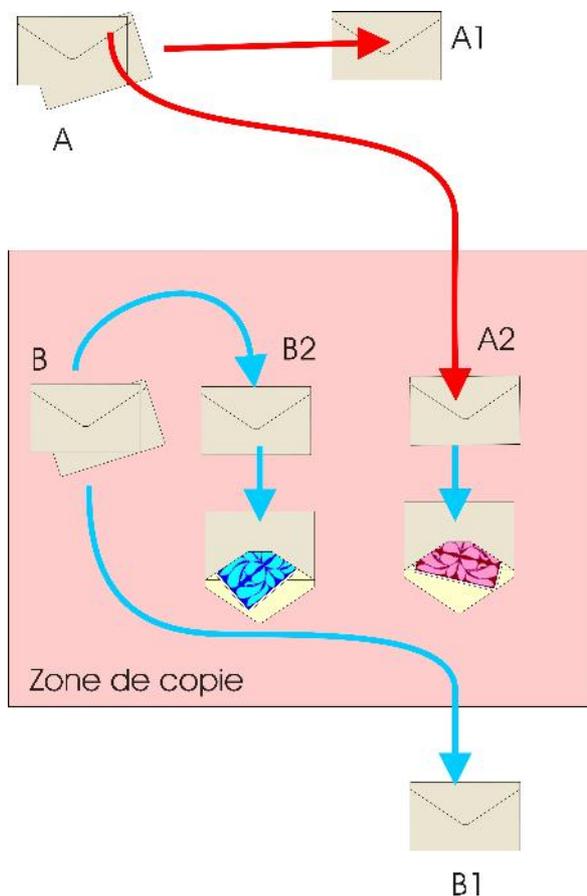
fig. 42

### Déroulement de l'expérience.

Pour chaque signe du message à transmettre (Attention! Nous ne commençons pas tout de suite, nous avons encore quelques détails à régler):

Alice prend une paire de particules à sa réserve. Elle garde une particule (fig. 42 ; A1) et passe l'autre (fig. 42 ; A2) à Charlie. Mais le fourbe, au lieu de transmettre la particule intacte à Bob, la mesure et la remplace par une fausse particule de sa fabrication, selon le protocole suivant (fig. 42):

- Il choisit quelle dimension il va mesurer.
- Sur la particule d'Alice (fig. 42 ; A2), il mesure cette dimension (selon le protocole de l'expérience 17, bien sûr, qui lui interdit de prendre connaissance de la valeur de la dimension non mesurée).
- Il mémorise la valeur de sa mesure.
- Il prend une paire de sa propre réserve (fig.



42 ; B). Sur une particule de cette paire, il mesure la même dimension que sur celle d'Alice (fig. 42 ; B2). Si la valeur mesurée est l'inverse de celle d'Alice, il fait passer la particule intacte de la paire comme une copie (fig. 42 ; B1). Si la valeur mesurée est la même que celle d'Alice, il détruit la particule intacte de sa propre paire et recommence avec une nouvelle paire<sup>34</sup>.  
e) Il passe la particule falsifiée à Bob. Les particules mesurées vont au rebut.

Bob signale à Alice qu'il a reçu la particule. Alice annonce **quelle dimension** elle s'apprête à mesurer, puis mesure cette dimension sur sa particule. Bob mesure la même dimension sur sa propre particule. Grâce à l'anticorrélation entre les particules, Alice peut dire à Bob s'il doit ou non inverser la valeur qu'il vient de mesurer pour obtenir le signe qu'elle veut transmettre.

Le mécanisme que Charlie utilise pour copier la particule est identique au premier de l'expérience 14. A l'époque, nous avons considéré ce procédé comme inacceptable, puisqu'il provoque l'effondrement des fonctions d'onde des 2 particules restantes (celle qu'Alice conserve et celle que Bob reçoit). Mais ici, c'est justement l'effet souhaité: Quand Charlie mesure la particule d'Alice, il provoque l'effondrement de la fonction d'onde de la paire d'Alice. Charlie connaît ainsi d'avance le résultat de la mesure qu'Alice fera sur sa particule... pour autant qu'Alice mesure la même dimension que Charlie. Alice et Bob ont donc des particules *nettes*. Mais tant que les valeurs qu'ils mesurent sont opposées, les fonctions d'onde leur semblent intactes. C'est quand Alice ne mesure pas la même dimension que Charlie que ça se gâte: Non seulement, notre pirate ignore la valeur de la mesure d'Alice, mais comme il a mesuré (et copié correctement) l'autre dimension, il a brisé la corrélation sur la dimension qu'Alice et Bob mesurent. Les erreurs que commet Charlie en copiant les particules falsifieront par conséquent le quart du message transmis<sup>35</sup>, ce qui devrait suffire à mettre la puce à l'oreille des correspondants.

Dans notre dispositif, il est donc impossible que le message soit intercepté sans que les correspondants s'en aperçoivent. Pour vérifier que la ligne est sur écoute, Alice peut par exemple envoyer un premier message anodin, que Bob répète à Alice publiquement. Une simple comparaison permet de détecter un espion. Si la ligne est "propre", le vrai message sera ensuite transmis.

Il existe une méthode plus subtile, que nos expérimentateurs vont utiliser ici: De temps en temps, une fois qu'Alice et Bob ont mesuré leurs particules selon la dimension demandée par Alice, la double mesure ne sert pas transmettre un signe, mais à vérifier la ligne. Alice demande alors à Bob quelle valeur il a obtenue. Une simple comparaison avec la valeur de sa propre particule peut mettre en évidence le piratage de la ligne. Intérêt supplémentaire: Seule Alice connaît le résultat du test; l'espion peut se croire à l'abri et devenir ainsi la proie facile d'une désinformation.

Alice, de temps en temps au cours de notre expérience, va utiliser la transmission pour vérifier la ligne, selon la méthode exposée au paragraphe précédent (si toutes les cartes sont utilisées, Alice aura, au début de la transmission du message, 12 cartes: 8 pour le message et 4 pour vérifier la ligne).

---

A la fin de l'expérience, nos 3 expérimentateurs comparent les messages qu'ils ont notés (fig. 43).

On constate que:

- $\frac{1}{4}$  des signes sont faux dans le message noté par Bob.
- Charlie a intercepté correctement la moitié du message.
- Une fois sur 4, la vérification de la ligne a détecté un espion.

---

34 Charlie pourrait utiliser un procédé plus économe en particules, en préparant d'avance des particules dont il connaît la valeur d'une dimension. En effet, s'il mesure une particule d'une de ses propres paires, il peut conserver la particule non mesurée et, puisqu'il en connaît la valeur (sur une dimension seulement, rappelons-le), l'utiliser ensuite pour remplacer une particule venant d'Alice. Ce procédé est certes plus efficace quand il s'applique à *nos* particules. Mais un espion qui doit manipuler des photons aura intérêt à se servir du procédé décrit dans l'expérience plutôt que d'avoir recours à un appareillage extrêmement complexe qui lui permettrait de conserver des photons dans un état déterminé et de les relâcher sur demande!

35 Dans la moitié des cas, Charlie copie la dimension qu'Alice choisira de mesurer. Dans l'autre moitié des cas, il a une chance sur deux de transmettre par hasard la bonne valeur.



Dans l'exemple de la fig. 43, Alice a composé le message "+1 , +1 , -1 , -1 , -1 , +1, -1, -1".

La transmission s'est passée de la façon suivante:

Paire 1

Charlie mesure la *teinte* et envoie à Bob une particule *noire*.

Alice dit à Bob qu'ils mesureront la *teinte*. Elle mesure sa particule: *rouge*. Donc, elle sait que Bob mesurera *noir*. Comme *noir* vaut -1, elle dit à Bob d'inverser la valeur de sa mesure.

Bob mesure sa particule, note le résultat, puis en inverse la valeur pour obtenir le premier signe du message.

Comme Charlie connaît la valeur de la mesure de Bob, il peut noter lui aussi le premier signe du message.

Paire 2

Charlie mesure le *dos* et passe à Bob une particule *rose*.

Alice choisit de mesurer la *teinte*. Elle mesure *noir* et dit à Bob de ne pas inverser la valeur de sa mesure. Bob mesure *rouge* qui vaut +1, valeur qu'il conserve.

Charlie n'a pas copié la bonne dimension. Ce signe du message lui échappe complètement. Par hasard, il a "copié" correctement la *teinte*, ce qui fait que Bob reçoit la bonne information.

Paire 3

Charlie mesure le *dos* et passe à Bob une particule *rose*.

Alice choisit de mesurer la *teinte*. Elle mesure *noir* et dit à Bob d'inverser la valeur de sa mesure. Mais à cause de la copie défectueuse de Charlie, Bob mesure lui aussi *noir* qui vaut -1, et note la valeur inverse: +1.

Là encore, Charlie a misé sur la mauvaise dimension.

Paire 4

Charlie mesure le *dos* et passe à Bob une particule *bleue*.

Alice choisit de mesurer le *dos*. Elle mesure *rose*. Pour vérifier la ligne, elle annonce à Bob qu'elle ne lui transmet pas un signe du message et lui demande quelle *teinte* il a mesuré. Bob lui annonce: *bleu*. Cette valeur étant l'inverse de la sienne, tout lui semble normal. Charlie, connaissant la valeur qu'il a copiée, sait qu'il n'a pas été repéré.

Paire 5

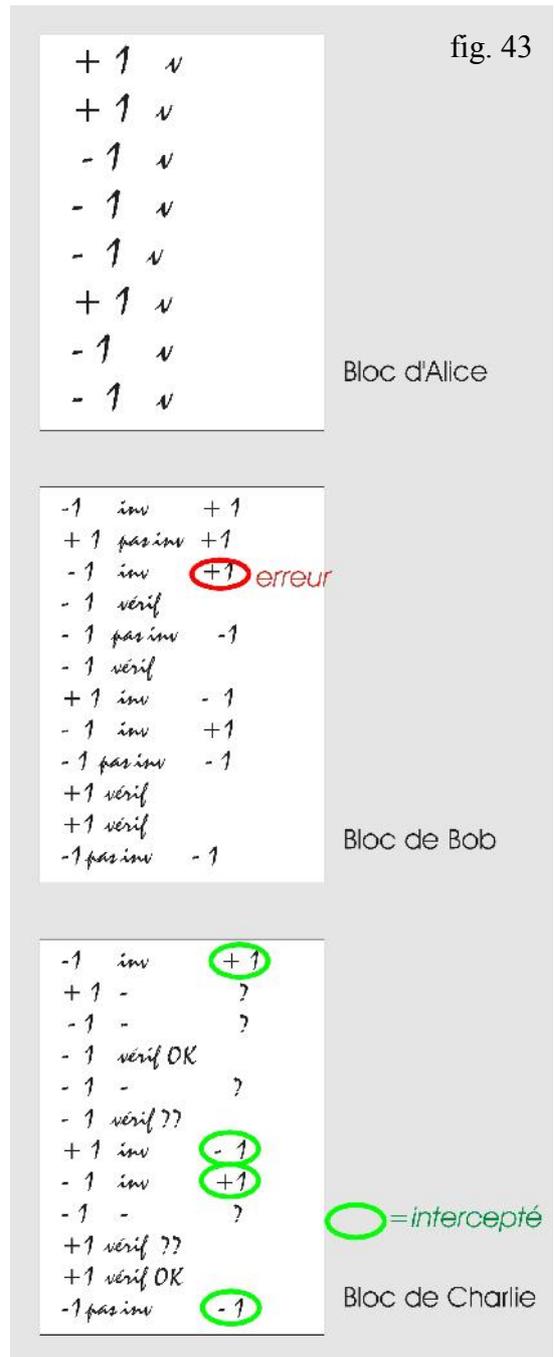
Charlie mesure la *teinte* et passe à Bob une particule *noire*.

Alice choisit de mesurer la *teinte*. Elle mesure *rouge* et dit à Bob de ne pas inverser la valeur de sa mesure. Bob peut noter -1. Mais Charlie aussi, cette fois.

Paire 6

Charlie mesure le *dos* et passe à Bob une particule *rose*.

Alice choisit de mesurer la *teinte*. Elle mesure *rouge*. Elle décide d'utiliser la paire courante pour vérifier la ligne. Bob lui annonce le résultat de sa mesure: *noir*. Charlie, qui a copié la mauvaise dimension, sait qu'il a une chance sur deux d'avoir été repéré.



(La suite de la transmission peut facilement être imaginée).

## Chapitre 4

### Particules floues et particules nettes

Bien que nos expérimentateurs aient partagé les mêmes manipulations, leurs opinions sont différentes. Écoutez-les...

#### Alice

Le matériel que nous avons utilisé s'est montré étonnamment efficace. Dans chaque expérience, les manipulations et les résultats donnaient une simulation crédible. Avec un peu d'imagination, ces fichues enveloppes semblaient vraiment en superpositions d'états! Mais c'est aussi le danger du modèle. A force de le voir fonctionner, on risque d'imaginer que les particules se comportent comme nos enveloppes, ce qui n'est pas le cas. Il faudrait aussi proposer des expériences où le modèle des cartes donne des résultats nettement différents que l'équivalent dans le monde des vraies particules.

Alice est décidément dans la ligne la plus orthodoxe de la mécanique quantique.

#### Bob

Toutes nos expériences ont fonctionné conformément à la théorie. Il est troublant que nos bouts de carton montrent des superposition d'états, qu'ils véhiculent des fonctions d'onde, qu'ils agissent à distance, toutes choses qui sembleraient interdites à des objets macroscopiques. Certes, ça ne prouve pas que les "vraies" particules aient un comportement similaire à celui des nôtres, ça prouve seulement que si elles avaient en effet ce comportement qu'on pourrait appeler (en tirant un peu sur la définition) "déterministe", on ne verrait pas la différence! Pour ma part, en attendant des expériences qui me convainquent du contraire, je crois en effet que les "vraies" particules ressemblent bigrement aux nôtres.

L'opinion de Bob est plus proche de celle des "réalistes".

#### Charlie

Je me suis bien amusé et j'ai appris beaucoup de choses. Pour moi, tous les phénomènes présentés sont clairs et montrent que la mécanique quantique est un outil extrêmement performant quand il s'agit de prédire le résultat d'une expérience. Je suis maintenant convaincu que les notions de *superposition d'états* ou d'*effet à distance* (instantané ou pas) sont des illusions qui apparaissent quand on veut absolument projeter une expression mathématique sur des objets. Je suis moins poète qu'Alice et moins philosophe que Bob: J'observe les choses et si je trouve une explication simple, je m'en contente... tant que l'explication simple tient la route...

Cette vision pragmatique rappelle l'attitude d'Einstein qui reprochait à la mécanique quantique d'être "seulement" un traitement mathématique de données et pas une représentation de la réalité.

---

Constatons que jusqu'ici, nos expériences pratiques ne nous ont pas permis de juger de la validité ou éventuellement de la supériorité de telle ou telle interprétation de la mécanique quantique.

Les expériences qui suivent ne vont pas nous aider à départager les rivaux, mais devraient nous permettre de mieux comprendre les arguments avancés par les tenants de diverses tendances.

## Expérience 21 - Particules nettes et particules floues

Commençons par ranger notre matériel:

- Alice vide toutes les enveloppes et met les cartes en vrac sur la table.
- Bob rassemble toutes les cartes à dos *rose* et forme une pile avec les 16 cartes de l'as au 4. Les 36 cartes à dos *rose* du 5 au roi ne seront pas utilisées et peuvent être écartées.
- Charlie rassemble les cartes à dos *bleu* et forme une pile avec les 16 cartes de l'as au 4. Il passe cette pile à Bob. Les 36 cartes à dos *bleu* restantes sont posées au milieu de la table.
- Alice vérifie que toutes les enveloppes sont vides et les empile.

### L'expérience

Bob mélange les 4 *cœurs* à dos *bleu* et les passe à Charlie, faces cachées. Il passe les 4 *trèfles* à dos *rose* à Alice, sans forcément les mélanger.

Avec les enveloppes d'Alice et les cartes à dos *bleu* du milieu de la table, les expérimentateurs créent 4 paires de particules à intrication simple, selon le protocole naturel de l'expérience 8 (page 22). Alice passe ensuite ses enveloppes vides à Bob (fig. 44). **Attention! Nous venons de créer des particules en mettant des cartes dans des enveloppes, comme d'habitude.**

Dans la suite de l'expérience, nous mettrons aussi des

cartes dans des enveloppes, mais là, nous ne créerons pas de particules: les cartes seront utilisées comme des étiquettes numérotées et les enveloppes serviront à les mettre à l'abri des regards. **Pour indiquer la différence entre une enveloppe et une particule proprement dite, les illustrations représenteront les particules en gris et les enveloppes en jaune.**

Bob sépare les particules d'une paire intriquée et les numérote, en posant sur une particule l'as de carreau à dos *bleu* et sur l'autre l'as de pique à dos *rose*.

Il fait de même pour les 3 paires restantes, en posant sur les particules d'une même paire une carte de même valeur numérale, prise parmi les *carreaux* à dos *bleu* et les *piques* à dos *rose*.

Alice pose devant elle les 4 particules numérotées par des *carreaux*,

sans mélanger la numérotation.

Charlie fait de même avec les 4 particules numérotées par des *piques*, mais après s'être éloigné suffisamment

fig. 44

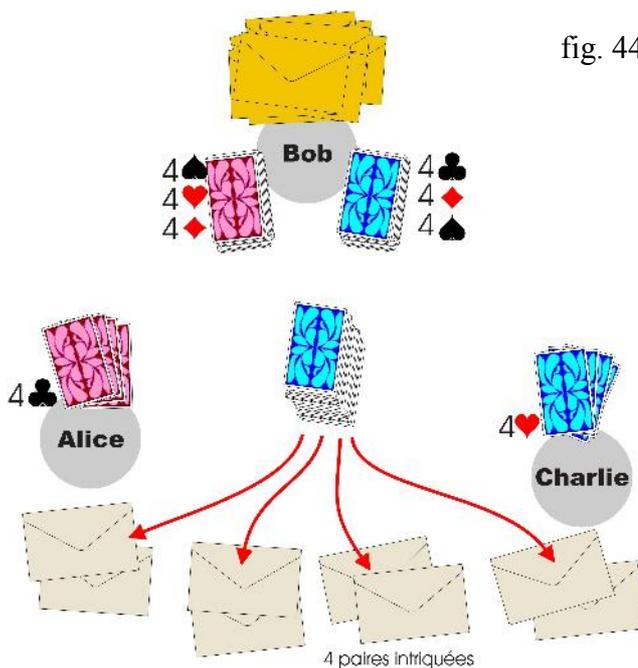
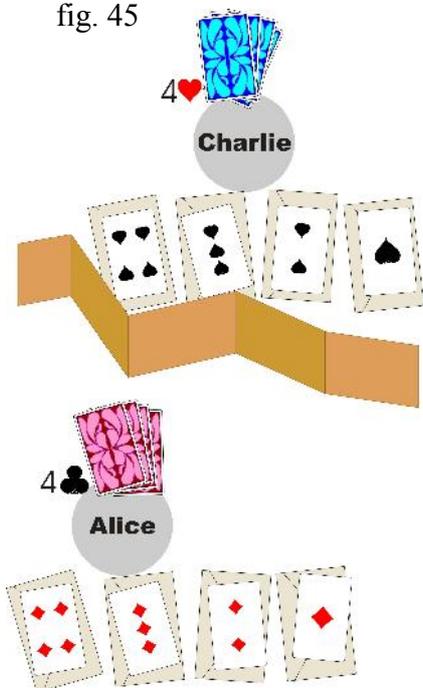


fig. 45



pour que ses camarades ne voient pas les manipulations qu'il fera lors de l'expérience (fig. 45).

La situation est comparable à celle de l'expérience 11 (Téléportation, page 27), sauf que cette fois-ci, nous avons en quelque sorte ouvert 4 canaux de transmission quantique. Si Charlie mesure une de ses particules, l'autre particule de la paire intriquée voit sa fonction d'onde s'effondrer. Une des particules d'Alice sera donc **nette**, les autres restant **floues**.

Voyons cela:

Pour éviter un biais psychologique, Charlie a recours à un tirage au sort pour déterminer la particule qu'il va mesurer: il pioche une carte dans son tas de 4 cartes à dos *bleu*; la valeur numérale de cette carte lui donne le numéro de la particule à mesurer; il mesure la *teinte* de cette particule. Il annonce qu'il a fait sa mesure (bien entendu, sans mentionner le numéro de la particule, ni le résultat de la mesure).

En vertu de son intrication avec la particule que Charlie vient de mesurer, une des particules d'Alice est maintenant **nette**.

### **Mais laquelle?**

#### **Opinion d'Alice**

Dans le cadre de notre expérience, il m'est évidemment impossible de donner une réponse, puisque nos pseudo-particules ne sont pas réellement en superposition d'états.

Bob intervient: - Et dans la "réalité", comment ferais-tu pour repérer la particule nette?

Alice: - Je pense que son comportement serait différent. Il doit bien y avoir un appareil ou un dispositif permettant de mettre en évidence, par exemple, qu'une particule est en même temps sur deux trajectoires différentes, ce qui ne peut arriver que si la particule est floue.

Bob: - A supposer qu'un tel appareil existe, tu pourrais donc reconnaître parmi tes 4 particules celle qui est nette? Tu te rends compte que cela signifierait que Charlie pourrait ainsi te transmettre par voie purement quantique un message qu'il aurait déterminé d'avance? Dans notre expérience, il a tiré au sort le numéro de la particule qu'il a mesuré, mais il aurait aussi bien pu mesurer délibérément par exemple la "3", pour te transmettre le message "3". Ne me dis pas que tu crois qu'une chose pareille est possible!

Alice: - C'est troublant, en effet. Il n'empêche qu'une de mes particules est bel et bien nette et que les autres ne le sont pas.

#### **Opinion de Bob**

Par définition, pour qu'une particule soit nette, il faut que sa fonction d'onde s'effondre. Et sa fonction d'onde, c'est la représentation mathématique de son état, ou plus exactement l'expression des probabilités de la valeur d'une mesure faite sur la particule. Tant qu'Alice ne reçoit aucune information lui permettant de modifier la description de ses 4 particules, elles sont toutes aussi floues qu'elles l'étaient avant que Charlie fasse sa mesure!

Mais Alice insiste: - Quand il s'agit de nos pseudo-particules ici, je suis d'accord avec toi, mais je suis sûre que dans la réalité un photon flou n'a pas le même comportement qu'un photon net!

#### **Opinion de Charlie**

Moi, je sais quelle particule d'Alice est nette.

Bob lève les bras au ciel: - Charlie! Toi, le seul parmi nous qui a toujours refusé d'admettre qu'une mesure ait un effet à distance, tu prétends qu'Alice a en sa possession une particule nette!

Charlie: - Je ne prétends rien de tel. Ce que je veux dire, c'est que moi, dans la représentation que j'ai ici, dans mon coin, des particules d'Alice, je peux en considérer une comme nette. Ça ne veut surtout pas dire que la particule correspondante chez Alice ait subi la moindre transformation. Mes mesures n'influencent que ma propre connaissance et n'ont strictement aucune action à distance. C'est seulement si je dis à Alice quelle particule j'ai mesurée qu'elle pourra ajouter cette information à ses connaissances et le cas échéant

modifier la description de ses particules.

Mais Alice n'est pas convaincue: - La particule devient nette au moment où tu fais ta mesure, parce que c'est à partir de là qu'elle ne peut plus prendre qu'une seule valeur possible. Que tu me mettes au courant ne change rien.

Tous ces arguments semblent corrects et conformes à l'expérience. Il sont pourtant irréductiblement contradictoires.

Charlie dévoile à ses camarades le numéro de la particule qu'il a mesurée. Maintenant, tout le monde est d'accord: la particule d'Alice portant le même numéro est **nette**.

On mesure cette particule d'Alice et on constate l'anticorrélation de la paire concernée.

Les restes des deux particules mesurées sont éliminés. On élimine aussi les 8 cartes portant le numéro de la double mesure qui vient d'être faite (4 cartes en possession de Bob et 2 en possession de chacun des autres).

Attention! A part les éléments que nous avons écartés au cours de l'expérience, tout le matériel reste en place pour être utilisé dans l'expérience 22.

## Expérience 22 - Influence de la mesure

(Sur les illustrations, on suppose que, dans l'expérience 21, Charlie a mesuré la particule N° 3).

Charlie rejoint ses camarades en apportant ses cartes et ses particules (sans perdre la numérotation!).

En respectant la numérotation des particules d'Alice et de Charlie, on reconstitue les paires intriquées (fig. 46). Les cartes ayant servi à numérotter les particules sont ensuite éliminées. Alice garde ses 3 cartes roses et Charlie ses 3 cartes bleues (fig. 47).

Bob sépare en 4 piles les cœurs, les carreaux, les piques et les trèfles des 12 cartes en sa possession. Il prend 3 enveloppes vides. Dans chacune, il met deux cartes rouges de même valeur numérale. Il mélange les 3 enveloppes et les empile.

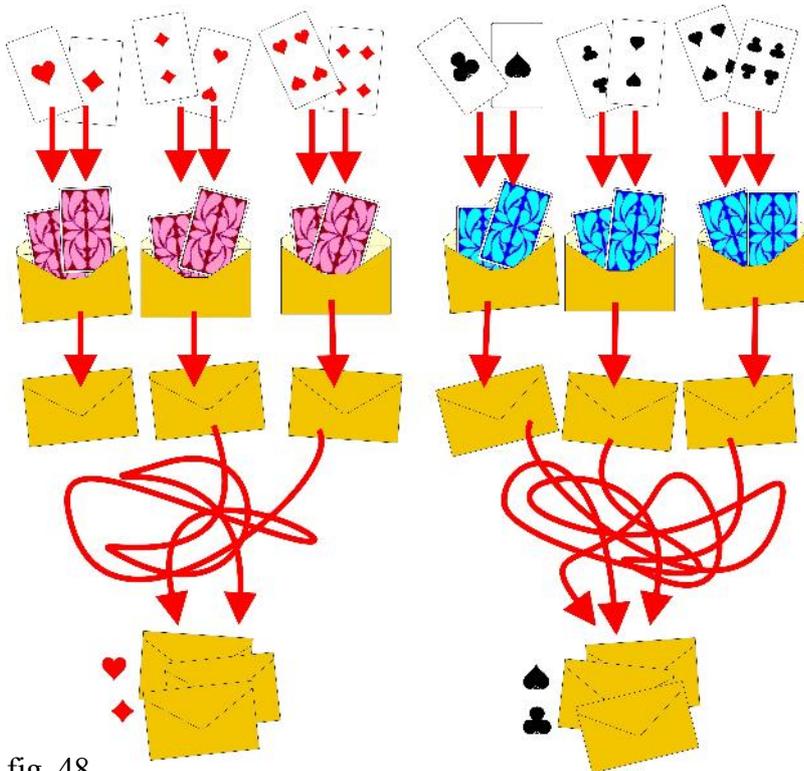


fig. 48

nécessairement aussi une enveloppe qui réunit un 3 rouge et un 2 noir. Charlie ne va détenir ses 3 enveloppes qu'un temps, pour éviter à Bob un risque d'erreur dans sa prochaine manipulation.

Bob prépare 6 enveloppes vides.

Il va ensuite faire 3 fois la manipulation suivante (fig. 50):

Il prend deux de ces enveloppes vides et met dans chacune d'elles une particule d'une même paire intriquée (une des 3 paires de la fig. 47). Il demande ensuite à Alice une de ses enveloppes. Il en extrait les

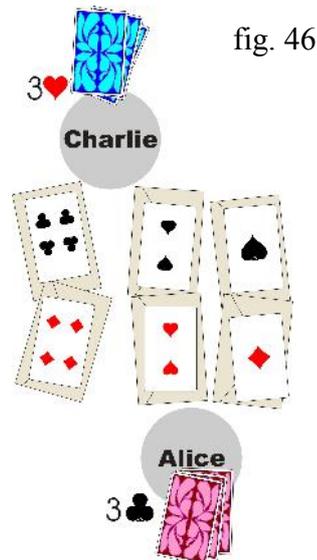


fig. 46

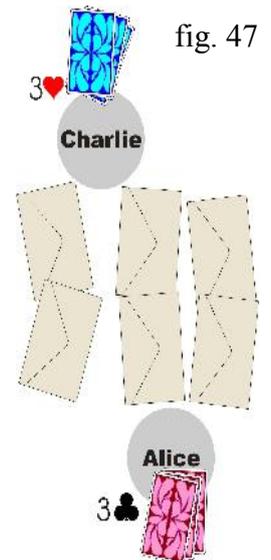


fig. 47

Il fait de même avec 3 nouvelles enveloppes vides et les cartes noires pour former une seconde pile (fig. 48).

Il va maintenant faire 3 fois la manipulation suivante (fig. 49):

Il prend une enveloppe sur la pile des rouges et une enveloppe sur la pile des noires. Il en sort les 4 cartes (2x2) et, surtout sans laisser apparaître la teinte, les remet dans leurs enveloppes, mais cette fois en mettant chaque fois une bleue et une rose dans la même enveloppe. Une de ces enveloppes manipulées est confiée à Alice, l'autre à Charlie.

Alice et Charlie ont maintenant chacun 3 enveloppes au contenu similaire. En effet, dans la collection d'Alice par exemple, si le 3 rouge est dans la même enveloppe que le 2 noir, Charlie aura

cartes et, sans laisser apparaître leur *teinte*, en met une dans chacune des enveloppes contenant une particule. Il place l'enveloppe accompagnée d'une carte *bleue* sur une pile et l'enveloppe accompagnée d'une carte *rose* sur une seconde pile.

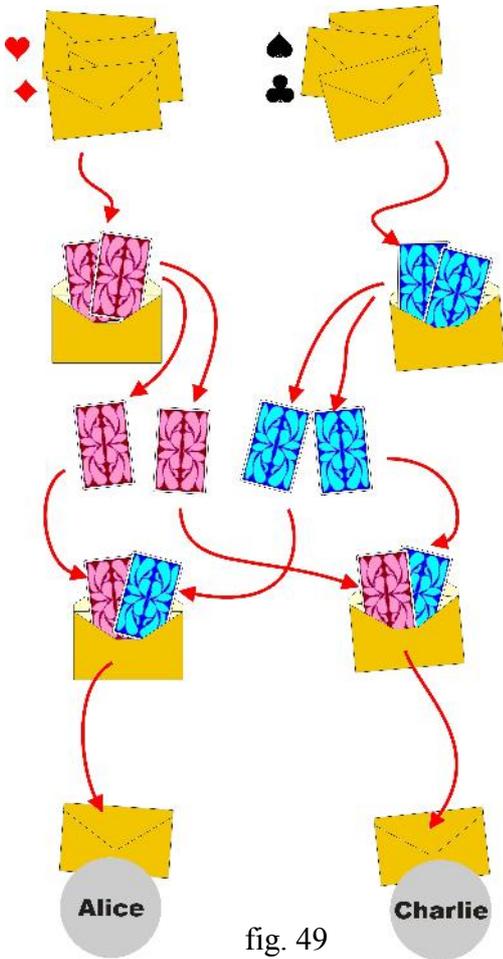


fig. 49

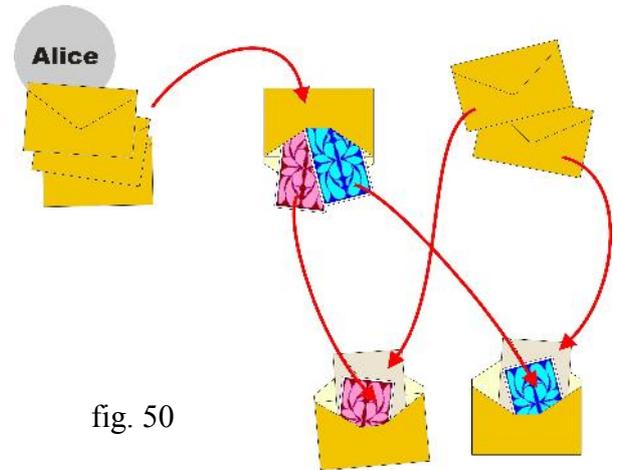


fig. 50

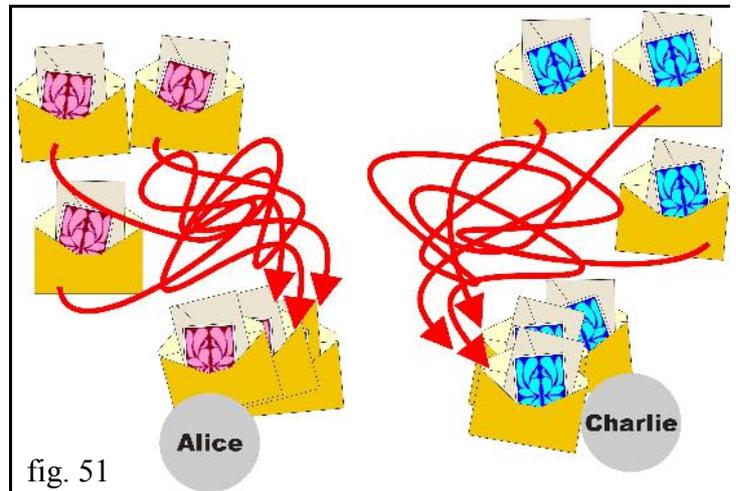


fig. 51

Il mélange ensuite les 3 enveloppes accompagnées d'une carte *rose* et les donne à Alice. Il mélange les 3 enveloppes accompagnées d'une carte *bleue* et les donne à Charlie (fig. 51). Il récupère les 3 enveloppes qu'il a confiées précédemment à Charlie.

Alice sort des enveloppes ses 3 particules et les dispose devant elle, chacune repérée par la carte qui l'accompagne, celle-ci tournée maintenant valeur numérique visible.

Charlie fait de même. Puis, comme dans l'expérience 21, il s'éloigne des autres (fig. 52).

Quand tout le monde est prêt, Alice tire au sort un numéro en piochant une carte dans son tas à dos *rose* et mesure la *teinte* de sa particule portant le même numéro. Bob observe tout.

Double question:

**Une des particules de Charlie est-elle maintenant nette? Et, si oui, laquelle?**

On se rend compte qu'il ne suffit pas de connaître le numéro de la particule mesurée par Alice, puisqu'il n'existe plus de correspondance immédiate avec une particule précise de Charlie. Selon une analyse superficielle, les particules semblent mélangées et leur corrélation serait dans ce cas brisée (effet de décohérence). Mais les précautions que nous avons prises nous ont permis de conserver la cohérence du système: une des enveloppes de Bob contient en effet une paire de cartes qui permet d'établir la correspondance entre la particule qu'Alice vient de mesurer et une particule précise de Charlie.

### Opinion d'Alice

Puisque j'ai effectué une mesure sur une particule intriquée, la particule associée est forcément nette.

Charlie ne peut se retenir: - Je t'assure qu'aucune de mes particules n'a changé!

Bob pointe vaguement son doigt vers les cartes de Charlie et demande à Alice: - Tu penses que ton fameux appareil à mesurer le flou donnerait un résultat?

Alice: - Il me semble, oui.

Bob: - Tu n'as pas l'air très sûre.

Alice: - En effet. Comme personne ne connaît la correspondance entre les membres de chaque paire, chacune des particules de Charlie a encore la possibilité d'être intriquée avec celle que j'ai mesurée. Enfin... peut-être.

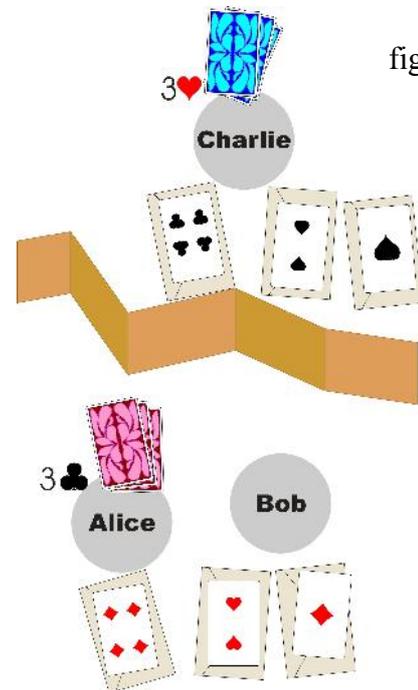


fig. 52

### Opinion de Bob

Personne d'entre nous n'a le moindre indice permettant de modifier les fonctions d'onde des particules de Charlie. Par conséquent, ses 3 particules sont toujours floues. Il ne suffit pas de faire une mesure. Il faut que cette mesure serve à modifier la connaissance qu'on a d'un système. Ce n'est qu'alors qu'une fonction d'onde se voit modifiée et peut s'effondrer (si l'information apportée par la mesure est suffisante).

Ce qui est remarquable, c'est que tout se passe comme si le contenu de mes trois enveloppes était en superposition d'états! Et pourtant, ce ne sont pas des particules. Même si on faisait l'expérience avec des photons, j'aurais là des enveloppes contenant des bouts de carton numérotés! Ça confirme ce que je pense: la superposition d'états n'est pas réservée au monde microscopique.

### Opinion de Charlie

D'une manière ou d'une autre, je ne peux décrire mes particules qu'au moyen de **mes** connaissances. Ce qui va les "modifier", ce n'est pas ce que vous faites **là-bas**, c'est ce que vous me dites et que j'interprète ensuite **ici**.

Maintenant, Bob examine le contenu de ses enveloppes, à la recherche de la carte *rouge* de même valeur numérique que celle qui repère la particule qu'Alice vient de mesurer. Dans la même enveloppe se trouve la carte *noire* indiquant le numéro de la particule de Charlie qui appartient à la même paire intriquée. Bob garde l'information pour soi.

Bob connaît désormais la correspondance entre les particules intriquées et il annonce qu'il sait quelle particule de Charlie est nette.

### Opinion d'Alice

Cette fois, une des particules de Charlie est définitivement nette! Avant, je reconnais que ça se discutait. Mais maintenant, quelqu'un **sait**. La particule en question ne peut plus prendre de valeur aléatoire.

La question de Bob ne surprend personne: - Et ton appareil donnerait à coup sûr un résultat?

Alice: - Là, c'est certain!

### **Opinion de Bob**

Pour **moi**, une certaine particule de Charlie est nette. Mais pour Alice, toutes sont floues. Et pour Charlie, encore plus.

### **Opinion de Charlie**

Ici, toujours rien à signaler. Mes particules sont toujours aussi tranquilles.

Maintenant, Bob montre à Alice la paire de cartes permettant d'établir la correspondance entre la particule qu'elle a mesurée et une particule de Charlie.

Alice hausse les épaules: - Qu'est-ce que ça change, que tu me montres ça? Que nous soyons deux à savoir ne rend pas la particule en question plus nette qu'elle l'est déjà!

La lectrice ou le lecteur a peut-être son opinion...

Pour terminer cette expérience, Alice et Bob annoncent à Charlie laquelle de ses particules est intriquée avec celle qu'Alice a mesurée. Charlie mesure cette particule. On constate l'anticorrélation de la double mesure.

Charlie rejoint ses camarades, avec ses cartes et ses particules (attention de ne pas perdre la numérotation des particules). Il s'assied en face d'Alice. On reconstitue les paires intriquées d'origine en se servant des cartes en possession de Bob. On peut maintenant éliminer presque tout le matériel, en ne gardant que:

- les 2 paires de particules qui ont survécu.
- une enveloppe vide.
- toutes les cartes à dos bleu inutilisées (il doit en rester 48 si on utilise un jeu complet).

### Expérience 23 - Remonter le temps ?

On retire du jeu à dos bleu 2 cartes *rouges* et 2 cartes *noires* quelconques et on les utilise pour étiqueter les particules d'une même paire intriquée: chaque particule d'une paire est marquée d'une carte *rouge* et chaque particule de l'autre d'une carte *noire*.

Alice et Charlie prennent chacun une particule étiquetée *rouge* et une particule étiquetée *noir*. Ceci nous ouvre deux canaux de transmission quantique, à la manière des deux expériences précédentes (fig. 53).

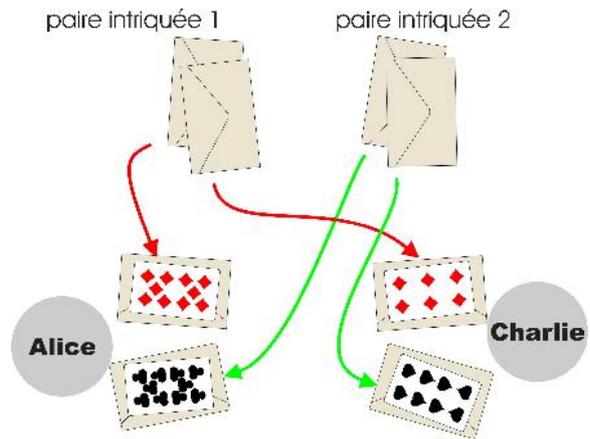


fig. 53

Tout le monde est d'accord pour estimer que toutes les particules sont **floues**.

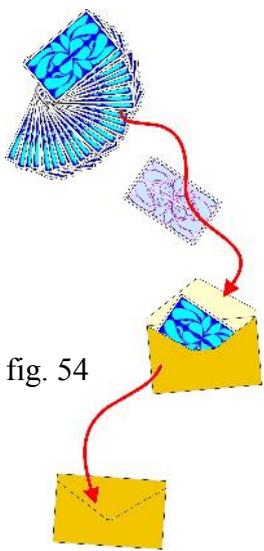


fig. 54

Bob mélange les 44 cartes restantes du jeu. Charlie coupe le tas de cartes que Bob présente ensuite en éventail à Alice, faces cachées. Alice tire une carte au hasard, qu'elle met immédiatement dans l'enveloppe vide. Aucun des expérimentateurs ne doit avoir la moindre idée de la *teinte* de cette carte. L'enveloppe fermée est posée sur la table.

Si on suit l'hypothèse qu'Alice a défendue dans les deux expériences précédentes, une de ses particules à elle devient **nette** si Charlie mesure une de ses particules. Il faut noter que la valeur de cette mesure n'a aucune importance. Seul compte le fait que le choix de Charlie se porte vers telle ou telle particule!

Établissons d'abord la chronologie d'une mesure de Charlie:

- ❶ Il choisit la particule qu'il va mesurer.
- ❷ Il effectue la mesure (selon le protocole de l'expérience 2).
- ❸ Il prend connaissance de la *teinte* de la carte.
- ❹ Il annonce le résultat à Alice et Bob.

Question: **A quel moment la particule intriquée d'Alice devient-elle nette?**

Reprenons la chronologie en sens inverse et voyons ce qu'en disent nos expérimentateurs<sup>36</sup>:

**La particule est-elle nette après le moment ❹ ?** (La mesure est faite et tout le monde sait quelle particule a été mesurée).

Alice: -Oui.

Bob: - Oui.

Charlie: - Oui.

**La particule est-elle nette après le moment ❸ ?** (La mesure est faite, mais seul Charlie sait quelle particule il a mesurée et quelle est sa valeur).

Alice: - Oui. Même si je ne sais pas laquelle, une de mes particule est nette parce qu'elle ne peut plus prendre qu'une seule valeur.

Bob: - Non, d'après nos connaissances, elle n'est pas nette. Tant que Charlie ne nous donne aucune informa-

<sup>36</sup> La série de questions s'adresse évidemment avant tout aux lectrices et lecteurs...

tion, elle est floue.

Charlie: - Pour moi, Alice a bel et bien une particule nette. Mais ce n'est que **ma** vérité, toute locale, qui n'a aucun effet à distance tant que je ne vous dis rien.

**La particule est-elle nette après le moment ② ?** (La mesure se fait. Charlie sait quelle particule il a mesurée, mais il n'en connaît pas encore la valeur).

Alice: - Oui. A ce stade, la situation est irréversible. On peut considérer que la mesure est faite. D'accord, Charlie n'en connaît pas encore le résultat... mais si c'était ça qui faisait la différence, il faudrait admettre un phénomène de l'ordre de la télépathie! Et je ne suis certainement pas prête à aller jusque là!

Bob: - Non, la particule est floue, pour les raisons que j'ai déjà avancées.

Charlie: Non. Une mesure n'est valable que si elle donne un résultat. A ce stade, je pourrais renoncer à terminer la mesure et détruire ma particule, ce qui forcerait la particule intriquée chez Alice à être définitivement floue<sup>37</sup>.

**La particule est-elle nette après le moment ① ?** (Charlie a choisi la particule qu'il va mesurer).

Alice: - Pas forcément. Si Charlie peut changer d'avis et choisir l'autre particule, la mesure n'est pas engagée et mes deux particules sont floues. Mais si Charlie choisit sa particule selon une méthode qui ne lui permet pas de modifier son choix, la particule intriquée, chez moi, ne serait peut-être pas parfaitement nette, mais elle serait certainement moins floue que mon autre particule.

Bob: - Une fonction d'onde qui s'effondre **avant** une mesure, ce serait au moins aussi bizarre que de la télépathie!

Charlie: - Absurde.

Alice: - Pas si absurde que ça! Si Charlie nous disait d'avance quelle particule il s'apprête à mesurer, cela aurait évidemment une influence sur la particule intriquée que j'ai ici; une influence plus ou moins forte, selon la confiance qu'on peut accorder à Charlie.

C'est sur cette très importante remarque d'Alice que nous allons nous appuyer pour la suite de l'expérience. Maintenant, même si ça nous paraît absurde, posons la dernière question de la série:

**La particule est-elle nette avant le moment ① ?** (Charlie n'a pas encore choisi la particule qu'il va mesurer).

Alice: - Non

Bob: - Non.

Charlie: - Non.

Là, nos expérimentateurs sont unanimes... mais voyons si nous pouvons les amener à penser autrement...

Au début de l'expérience, nous avons mis une carte dans une enveloppe. Nos trois amis reçoivent la consigne suivante:

**Dans 10 minutes, ils ouvriront cette enveloppe et regarderont la teinte de la carte qui s'y trouve. Ils mesureront la particule de Charlie repérée par la même teinte. Ils doivent s'engager à faire tout ce qui est en leur pouvoir pour que cette mesure ait lieu.**

Maintenant, posons la question:

**A l'heure actuelle, une des particules d'Alice est-elle nette?**

### Opinion de Charlie

Alors là, on exagère! Cette notion de particule nette ou particule floue n'est qu'une commodité de langage. Il est ridicule de vouloir en faire une propriété de la matière!

<sup>37</sup> Charlie fait allusion à la création de particules isolées selon notre protocole naturel, sujet de l'expérience 8.

### Opinion de Bob

Puisque nous sommes sûrs à quasiment 100% que nous mesurerons une particule de Charlie, nous savons qu'une des deux particules d'Alice sera tôt ou tard nette. Mais certainement pas avant la mesure.

### Opinion d'Alice

Si nous sommes aussi sûrs que ça que nous mesurerons une particule de Charlie, et surtout si nous sommes sûrs que nous ne mesurerons pas sa seconde particule, alors une de mes deux particules doit être en effet plus nette que l'autre. La carte que j'ai tirée au sort et qui est dans notre enveloppe n'est pas une particule. Par conséquent, elle n'est pas en superposition d'états et elle ne va pas changer jusqu'au moment de la mesure. Le choix de la particule de Charlie est donc déjà fait, et la mesure se fera avec certitude, sauf accident extraordinairement improbable.

Bob s'étonne: - Une mesure que nous ferons dans quelques minutes aurait déjà influencé une de tes particules?

Charlie éclate de rire: - Il ne manquait plus que ça: une machine à remonter le temps! Nous devrions préparer quelques enveloppes et nous envoyer le prochain tirage du loto!

Alice: - Nos particules ne sont pas des vraies, ça ne peut pas marcher.

Charlie: - Parce qu'avec des vraies particules, ça fonctionnerait, d'après toi? Ah! On peut dire que tu as la foi!

Alice: - Et en plus, de toute manière, il ne s'agit pas de remonter le temps. C'est le tirage au sort que nous avons fait au début de l'expérience qui modifie la fonction d'onde de mes particules et pas une décision prise plus tard.

Bob: - Donc, d'après toi, Alice, si nous avons de "vraies" particules et si nous avons ton très hypothétique appareil à détecter la superposition d'états, nous pourrions connaître la teinte de la carte de notre enveloppe?

Alice: - A condition que, dans l'avenir, nous fassions effectivement la mesure en question.

Bob: - Et c'est là que ton raisonnement ne tient plus. Parce que si ton appareil ne détectait pas de superposition d'états, cela signifierait que dans l'avenir, la mesure ne se ferait pas. Dans ce cas, la décision serait prise **après** ta détection et on aurait bel et bien fait remonter une information vers le passé!

Charlie: - Voilà ce qui arrive quand on veut faire passer la théorie avant la pratique.

Nos trois amis ont si bien compris la leçon de nos expériences qu'ils sont capables, comme on le voit, de conduire des disputes dignes des spécialistes de la mécanique quantique! Arriveront-ils seulement à se mettre d'accord sur le fait d'effectuer ou non la seule mesure de cette expérience?

## Expériences complémentaires

Notre modèle "Une carte dans une enveloppe" a atteint les limites de ses possibilités. Mais notre exploration pourtant sommaire de la mécanique quantique ne peut en aucun cas éviter les deux expériences aussi célèbres qu'incontournables qui sont le sujet des deux derniers chapitres de l'ouvrage.

Le problème, c'est que pour les aborder tout de même, nous sommes contraints de nous servir de modèles qui n'ont pas la rigueur de celui que nous avons utilisé jusqu'ici. **De ce fait, les deux chapitres qui suivent ne peuvent prétendre à aucune valeur scientifique<sup>38</sup>.**

Les mécanismes que nous allons utiliser dans les expériences qui suivent ont pour fonction de reproduire le plus fidèlement possible les manipulations et les résultats des dispositifs des "vrais" laboratoires. Même s'il est facile de se laisser prendre au jeu, rappelez-vous que nos expériences n'ont pas valeur de démonstration. Les plus critiques ont le droit de n'y voir que des tours de passe-passe...

---

38 Certains seront d'avis que tout ce qui a précédé est également sans valeur scientifique. Espérons qu'ils reconnaissent au moins que l'intention y était...

## Chapitre 5

### Les inégalités de Bell

Le paradoxe E.P.R. (voir notre expérience 18) repose sur la double notion de **réalisme local**, qu'on pourrait résumer ainsi:

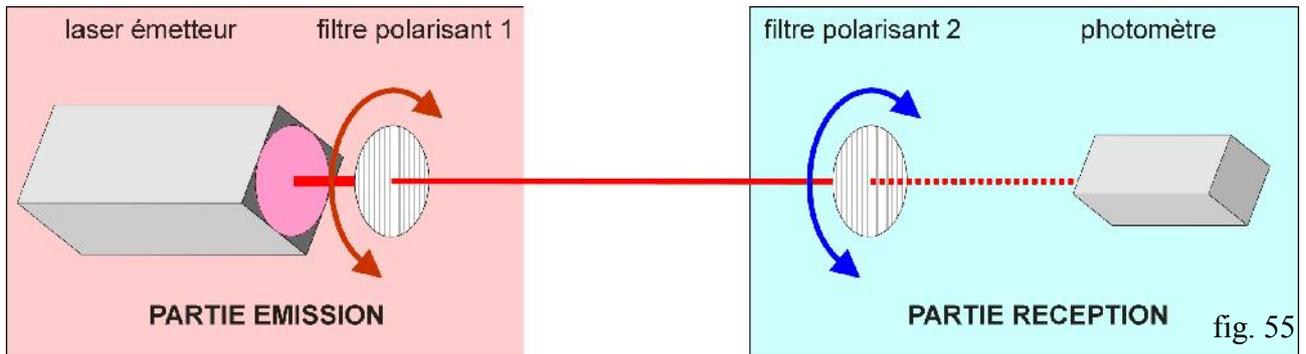
**1** (réalisme) Les particules ont une valeur déterminée (même si elle est inconnue) qui ne dépend pas de la mesure.

**2** (localité) Un éventuel effet à distance doit s'expliquer dans le cadre "classique" de la physique. Un tel effet ne peut, notamment, pas se propager plus vite que la lumière.

En 1964, J. S. Bell imagine une expérience destinée à prouver la fausseté de l'hypothèse du réalisme local. C'est cette expérience que nous allons simuler. Le matériel et les manipulations sont complexes, une approche pas à pas est indispensable.

## Expérience 24 - Particules polarisées.

Commençons par simuler un appareillage simple (fig. 55) qui fera partie de notre montage final.



Matériel à représenter: Un dispositif permet d'émettre une particule polarisée (polarisation: voir page 23) dont le sens de la polarisation est **aléatoire**. On exprimera ici le sens de la polarisation par l'angle qu'il forme avec la verticale. Dans la pratique, par exemple, devant un projecteur qui émet pendant un bref instant un pinceau lumineux concentré, on met dans une position aléatoire un disque polarisant. Le petit paquet de lumière est donc polarisé aléatoirement, avec une probabilité identique pour tous les angles possibles. Si on assimile le signal à une particule quantique, il se trouve dans un état où tous les angles possibles sont superposés selon une fonction d'onde qui s'effondrera au moment de la mesure pour prendre une valeur unique. Pour mesurer une particule, on peut intercepter sa trajectoire avec un filtre polarisant, qui va arrêter une proportion plus ou moins grande de particules, selon l'orientation et la précision de ce filtre. Pour qu'un photomètre, placé après ce filtre, détecte un maximum de lumière, il faut que les deux filtres (côté émission et côté réception) aient la même orientation. Plus les orientations des deux filtres sont décalées, moins le photomètre reçoit de lumière. Pour simplifier notre modèle, nous assimilerons la précision d'un filtre à un angle d'ouverture: si le sens de polarisation d'une particule est à l'intérieur de cet angle, cette particule sera détectée; sinon, elle sera arrêtée par le filtre. Sur la fig. 56, l'angle du filtre **b** est plus serré que l'angle du filtre **a**: **b** laisse passer moins de signaux que **a**.

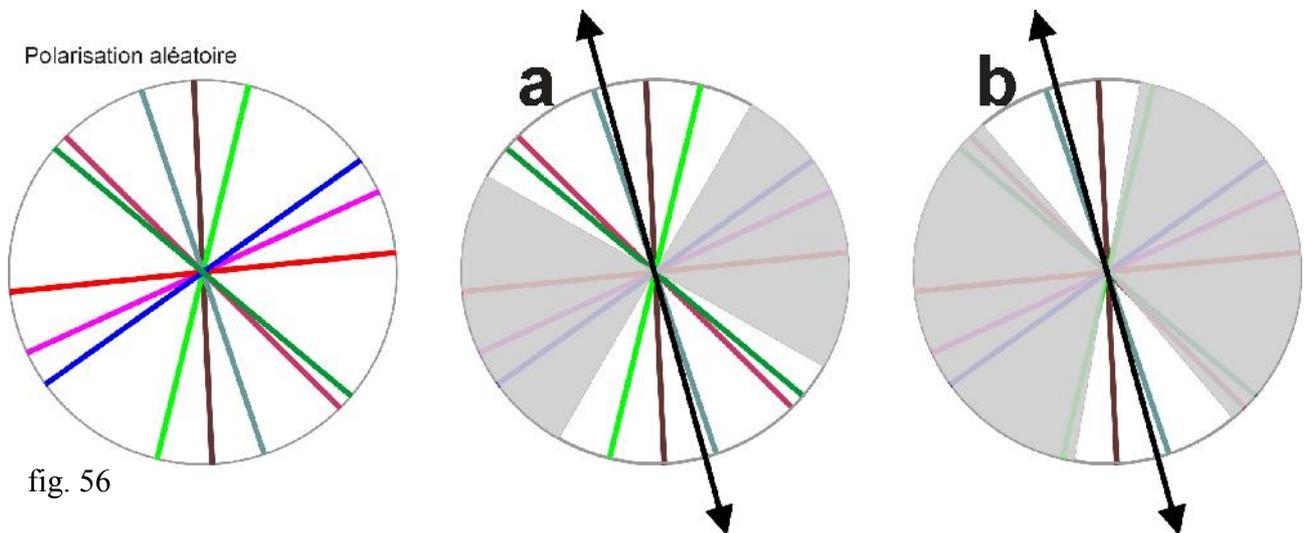
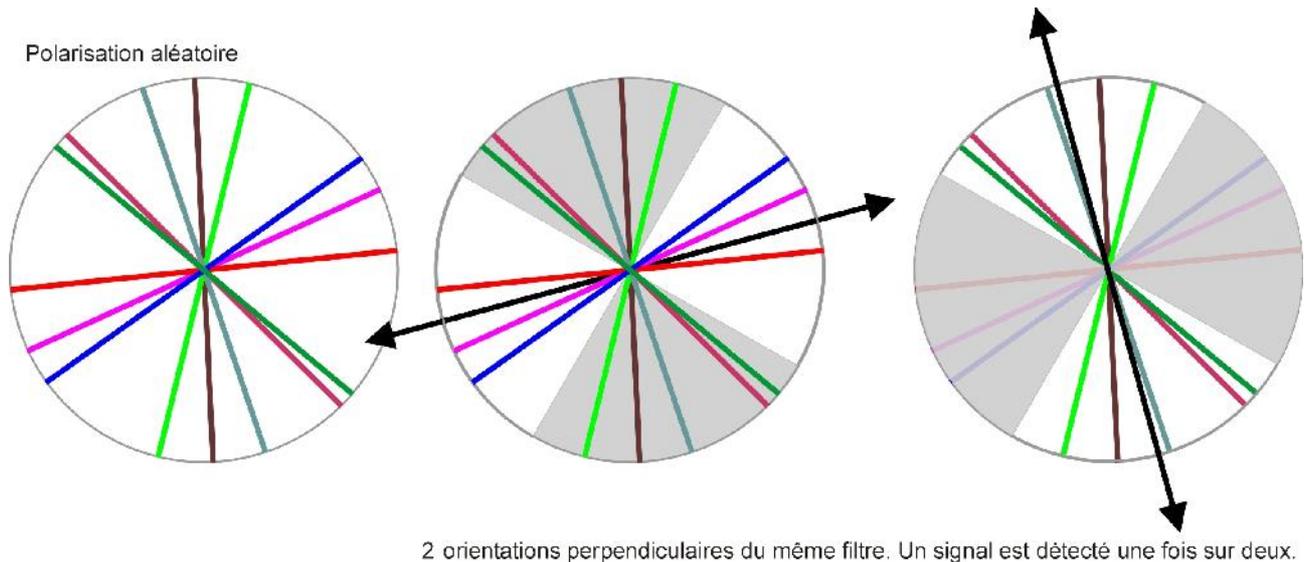


fig. 56

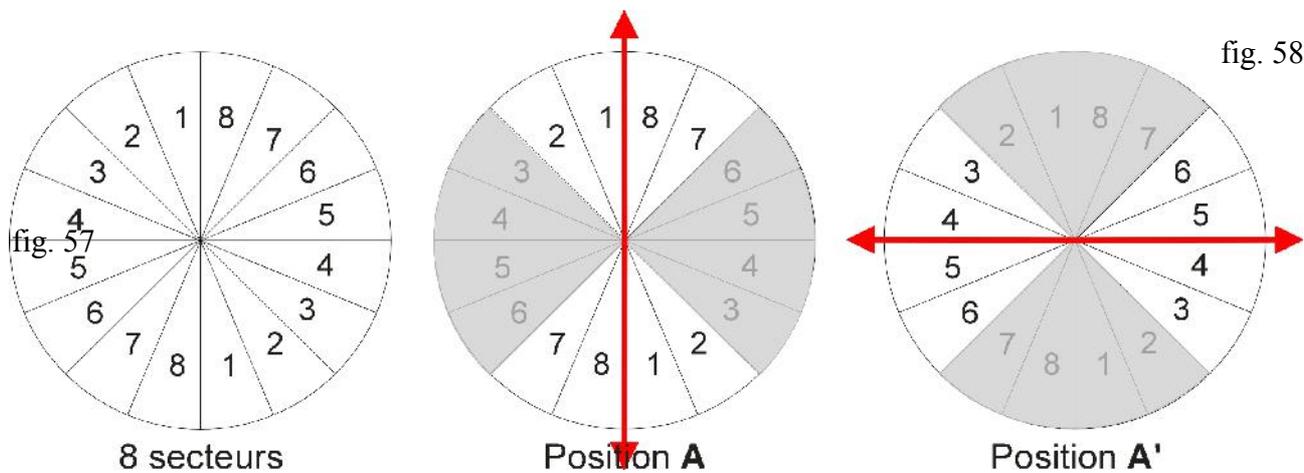
2 filtres de précisions différentes. Les signaux dans les parties grisées sont arrêtés.

Un filtre qui a un angle d'ouverture de  $90^\circ$  (**a** dans la fig. 56) laisse passer exactement 50% des signaux. En limitant les positions autorisées d'un tel filtre à deux directions perpendiculaires, on se trouve dans la situation de la fig. 57: Un signal d'une polarisation quelconque a une chance sur deux d'être mesuré, selon la direction choisie pour le filtre de détection.

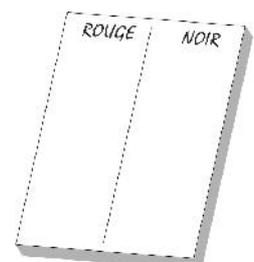
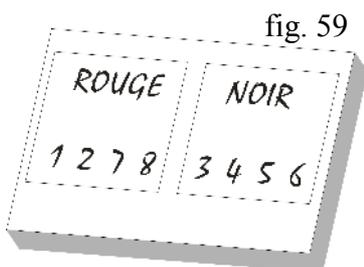


Traduisons ceci en un modèle:

Charlie trie le jeu à dos *rose* pour n'en garder que les 32 cartes de l'as au 8. Les 20 cartes à dos rose du 9 au roi sont confiées à Bob, qui vérifie la composition de ce tas avant de l'écarter (ces cartes ne serviront pas avant l'expérience 28). Charlie mélange son tas et le pose devant lui, faces cachées. Ces cartes vont représenter les particules, chaque valeur étant associée à un sens de polarisation, selon la convention illustrée sur la fig. 58. Chaque valeur correspondant à une tranche de  $22,5^\circ$ , la distribution est homogène.



Alice mélange le jeu (entier) à dos *bleu* et le pose devant elle, faces cachées. Pour mesurer une particule, Alice tournera un filtre imaginaire dans une des deux positions possibles (fig. 58). La position A ( $0^\circ$ ) permet de détecter les particules numérotées 1, 2, 7 et 8. La position A' ( $90^\circ$ ) détecte les particules numérotées 3, 4, 5 et 6. Pour ne pas introduire de biais psychologique, Alice ne choisira pas librement l'orientation de son filtre, mais s'en remettra au hasard, en prenant la première carte de son tas de cartes à dos *bleu*. Si la *teinte* de cette carte est *rouge*, la position du filtre imaginaire est A. Si la *teinte* de cette carte est *noire*, la position du filtre imaginaire est A'. Alice note sur un bloc le résumé de cette règle (fig. 59).



Bob prépare un bloc dont il partage une page en deux colonnes intitulées ROUGE et NOIR. Il y comptabilisera les mesures d'Alice (fig. 60).

Jusqu'à épuisement du jeu à dos *rose* de Charlie, nos expérimentateurs vont répéter la série de manipulation suivante:

- 1) Charlie prélève la première carte de son tas de cartes à dos *rose* et, sans en dévoiler la valeur, la glisse vers Alice.
- 2) Alice prend la première carte de son jeu à dos *bleu* et en annonce la *teinte*. Bob sélectionne la colonne correspondante sur son bloc pour y noter le résultat de la mesure qu'Alice s'apprête à faire. Alice pose la carte sur son propre bloc, de manière à ne laisser apparaître que les valeurs concernées par la *teinte* de la carte (fig. 61).
- 3) Alice retourne la carte que lui a passée Charlie. Si sa valeur est visible sur son bloc, elle annonce à Bob: "Détecté". Sinon, elle annonce: "Non détecté" (fig. 62).
- 4) Bob note (dans la colonne précédemment sélectionnée) "+1" si Alice lui a annoncé "Détecté". Il note "-1" si Alice lui a annoncé "Non détecté".
- 5) Alice met au rebut les deux cartes qu'elle vient de manipuler.

Dans l'exemple (fig. 61 et 62), Alice retourne une carte rouge. Elle en informe Bob qui sélectionne donc la colonne ROUGE de son bloc. Alice cache la partie NOIR de son bloc. Elle retourne ensuite la carte de Charlie: un "8". "8" figurant sur la liste visible de son bloc, elle annonce: "Détecté". Bob marque donc "+1" dans sa colonne ROUGE.

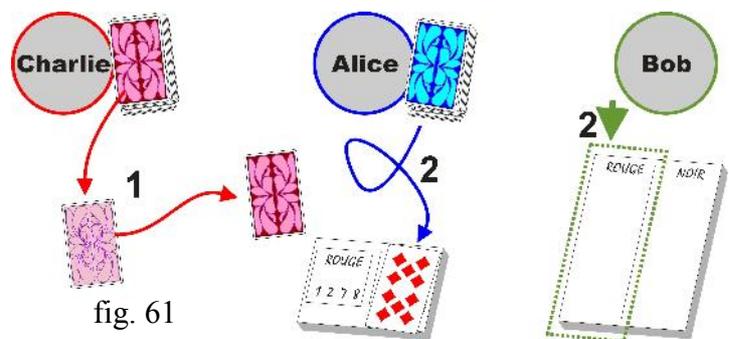
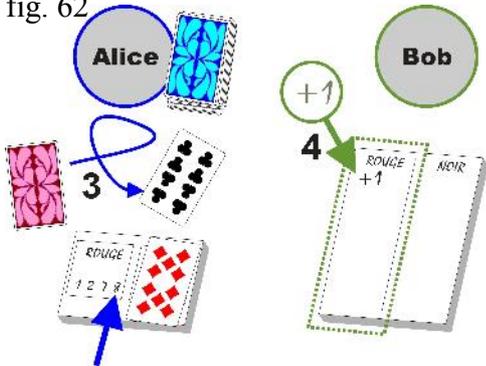


fig. 61

fig. 62



À la fin de l'expérience, on constate que les résultats notés par Bob se répartissent de manière homogène entre les "+1 ROUGE", les "-1 ROUGE", les "+1 NOIR" et les "-1 NOIR". Ce qui est conforme à la prédiction commune de toutes les hypothèses envisagées.

## Expérience 25 - Mesure des coïncidences.

L'expérience proposée par Bell utilise un dispositif comparable à celui de l'expérience 24, mais qui émet deux particules, chacune étant mesurée séparément comme dans l'expérience 24.

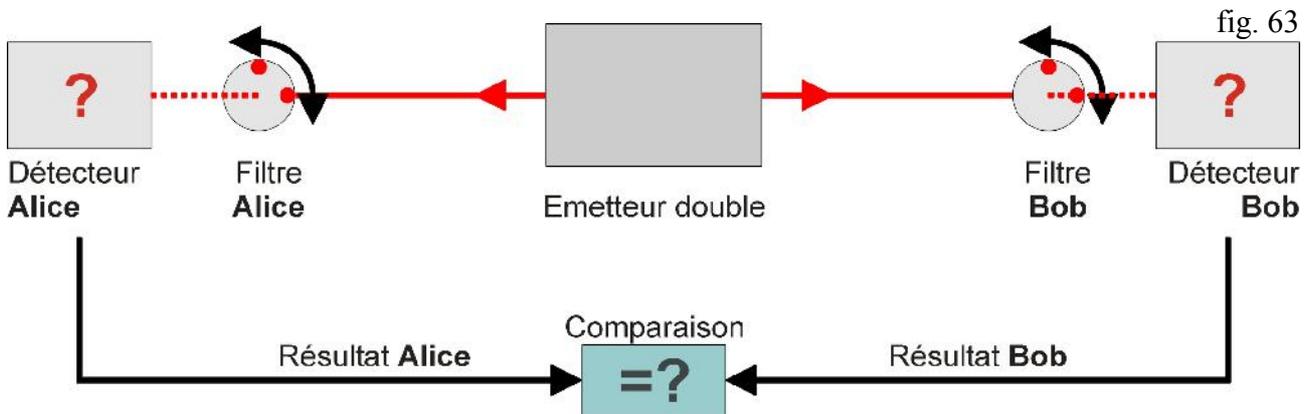
Les mesures sont confiées à deux expérimentateurs qui agissent indépendamment l'un de l'autre, chacun orientant son filtre au hasard avant la mesure. Dans cette expérience, les deux expérimentateurs ont le même équipement, qui leur donne le choix entre les deux mêmes positions ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ). On compare ensuite les deux mesures.

Suivant une logique élémentaire, on dira que les mesures sont différentes dans deux cas:

- 1) Alice n'a pas détecté de particule alors que Bob a détecté la sienne.
- 2) Bob n'a pas détecté de particule alors qu'Alice a détecté la sienne.

Et on dira que les mesures sont identiques dans deux cas:

- 1) Alice et Bob ont tous deux détecté leur particule.
- 2) Ni Alice ni Bob n'ont détecté de particule.



Dans cette expérience, les deux particules émises sont polarisées selon des angles quelconques, elles ne sont donc pas corrélées<sup>39</sup>.

Construisons l'équipement nécessaire à la simulation...

Bob reforme le jeu à dos *bleu* et le mélange. Il en répartit ensuite les cartes en deux tas de 26 cartes.

Charlie récupère les 32 cartes à dos *rose*, les mélange et pose le tas devant lui, faces cachées.

Bob trace sur un bloc le même schéma qu'Alice a utilisé dans l'expérience 24 (fig. 59). Il passe à Alice un des deux tas de cartes à dos *bleu*. Alice et Bob ont donc les deux le même outillage.

Charlie cumulera deux fonctions:

- 1) Il servira d'émetteur.
- 2) Il comptabilisera les résultats des mesures. Pour cela, il sépare une page de bloc en 2 colonnes intitulées "IDENTIQUES" et "DIFFERENTS".

Nos amis vont maintenant effectuer 16 fois la série suivante de manipulations:

- 1) Charlie prend deux cartes sur son tas, sans laisser apparaître leur valeur. Il glisse une carte vers Alice et une carte vers Bob.

<sup>39</sup> Elles ne sont pas non plus anticorrélées, bien sûr.

- 2) Alice et Bob prennent chacun une carte sur leur jeu à dos *bleu* et l'utilisent pour sélectionner une moitié de leur bloc, exactement comme Alice dans l'expérience 24.
- 3) Alice et Bob retournent leur carte venant de Charlie et en comparent la valeur avec la liste visible sur leur bloc.
- 4) Alice et Bob annoncent leurs résultats ("Déecté" ou "Non déecté") à Charlie.
- 5) Si les résultats d'Alice et de Bob sont identiques, Charlie ajoute une coche dans la colonne "IDENTIQUES" de son bloc. Si Alice et Bob annoncent des résultats différents, il ajoute une coche à sa colonne "DIFFERENTS".

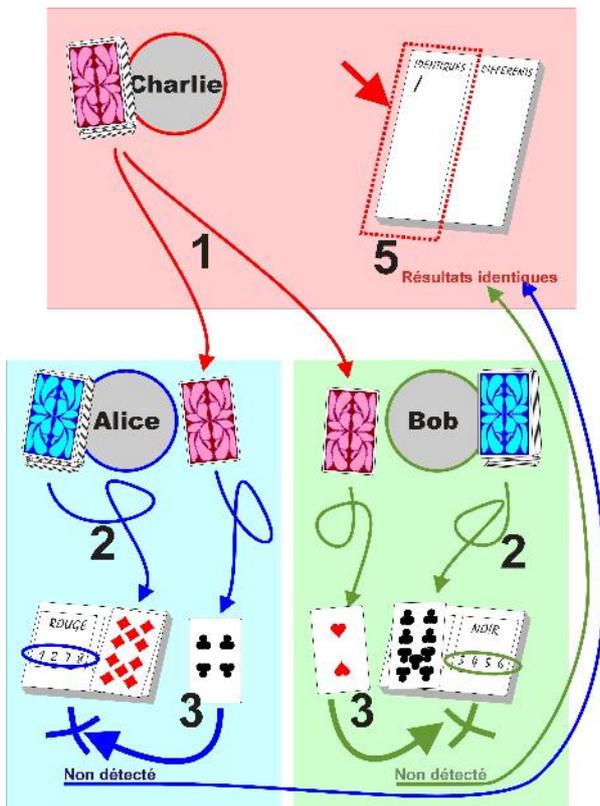


fig. 64

Dans l'exemple (fig. 64), Alice retourne une carte rouge et cache la partie NOIR de son bloc. Bob retourne une carte noire et cache la partie ROUGE de son bloc. Alice a reçu de Charlie un "4". Elle n'a pas cette valeur sur sa liste visible. Elle annonce donc: "Non déecté". Bob a reçu de Charlie un "2". Cette valeur ne figurant pas sur sa liste visible, il annonce donc: "Non déecté". Les deux résultats étant identiques, Charlie ajoute une coche dans la colonne IDENTIQUES de son bloc.

A la fin de l'expérience, on totalise séparément les coches de chaque colonne du bloc de Charlie et on constate qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux totaux<sup>40</sup>.

<sup>40</sup> On améliore considérablement la validité du résultat en répétant l'expérience plusieurs fois et en cumulant les totaux du bloc de Charlie. Cette remarque est valable pour toutes les expériences de ce chapitre. On peut même dire que si vous voulez vraiment être sûr (e)s des résultats, vous ne pouvez pas éviter cet effort!

## Expérience 26 - Polarisations corrélées.

Dans l'expérience de Bell, les deux particules émises doivent être **corrélées**, ce qui est réalisé en les polari-sant dans le même sens.

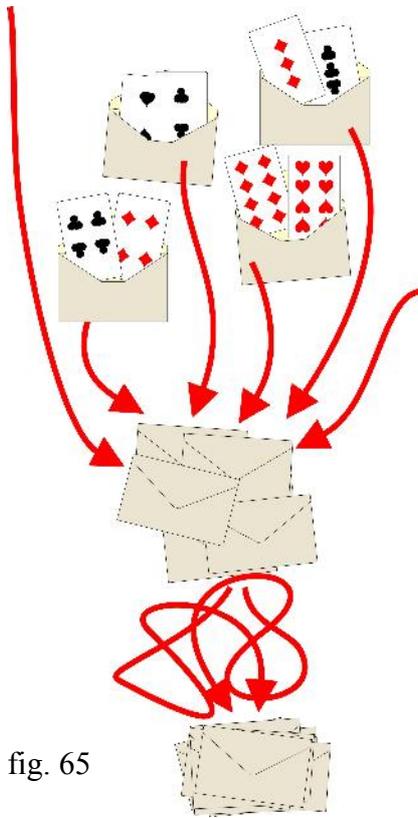


fig. 65

Adaptons notre matériel:

Bob reforme le jeu à dos *bleu* et le mélange. Il en répartit ensuite les cartes en deux tas de 26 cartes.

Alice et Charlie se partagent le travail suivant (Bob pourra venir leur prêter main-forte quand il aura terminé sa tâche): Ils récupèrent les 32 cartes à dos *rose* utilisées dans l'expérience 25 et les regroupent par couples de même valeur numérale (sans s'occuper de la *teinte*). Chaque couple est mis dans une enveloppe. Charlie mélange ensuite ces 16 enveloppes et les empile devant lui (fig. 65).

Comme les deux particules émises sont polarisées selon le même angle, on comprend facilement que si Alice et Bob tournent leur filtre dans la même position ils obtiennent tous deux le même résultat (2 fois détecté ou 2 fois non détecté). S'ils orientent leur filtre dans des positions différentes, ils obtiennent fatalement des résultats opposés: à cause de l'angle d'ouverture de  $90^\circ$  des filtres, un seul détecte une particule.

Bob passe à Alice un des deux tas de cartes à dos *bleu*.

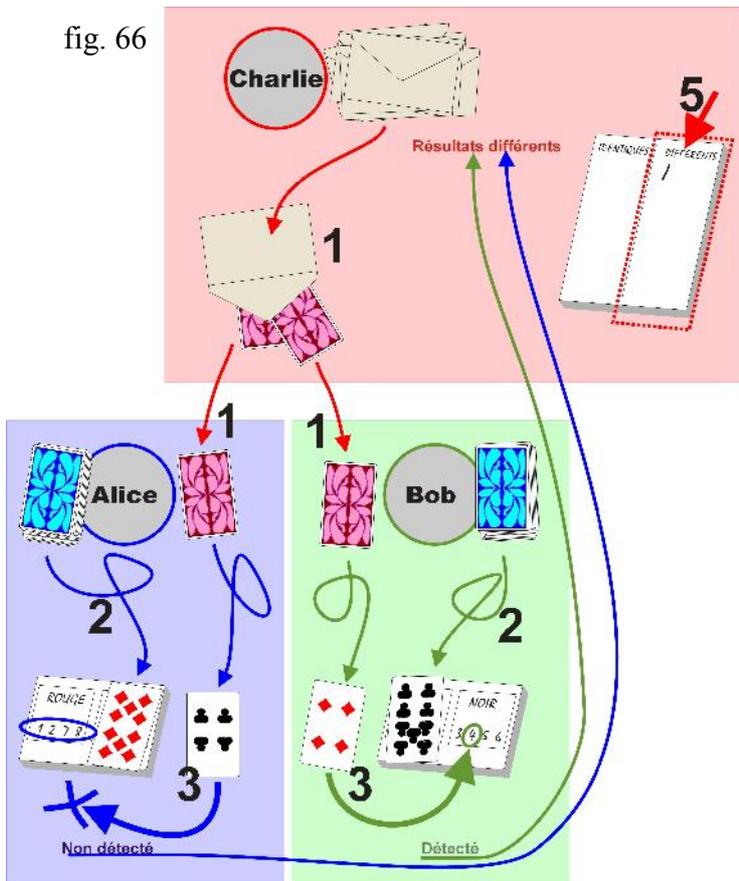
Nous pouvons maintenant refaire l'expérience 24 avec pour seule modification la technique utilisée par Charlie pour émettre ses particules.

Les expérimentateurs effectuent 16 fois la série suivante de manipulations:

- 1) Charlie prend une enveloppe sur son tas et en extrait les cartes, sans laisser apparaître leur valeur. Il glisse une carte vers Alice et une carte vers Bob. Il écarte l'enveloppe vide.
- 2) Alice et Bob prennent chacun une carte sur leur jeu à dos *bleu* et l'utilisent pour cacher une moitié de leur bloc, exactement comme Alice dans l'expérience 24.
- 3) Alice et Bob retournent leur carte venant de Charlie et en comparent la valeur avec la liste visible sur leur bloc.
- 4) Alice et Bob annoncent leurs résultats ("Détecté" ou "Non détecté") à Charlie.
- 5) Si les résultats d'Alice et de Bob sont identiques, Charlie ajoute une coche dans la colonne "IDENTIQUES" de son bloc. Si Alice et Bob annoncent des résultats différents, il ajoute une coche à sa colonne "DIFFERENTS".

Dans l'exemple (fig. 66), Alice retourne une carte rouge et cache la partie NOIR de son bloc. Bob retourne une carte noire et cache la partie ROUGE de son bloc. Les cartes roses de Charlie sont des "4". Alice n'a pas cette valeur sur sa liste visible. Elle annonce donc: "Non détecté". Bob a la valeur sur sa liste et annonce "Détecté". Les deux résultats étant différents, Charlie ajoute une coche dans la colonne "DIFFERENTS" de son bloc.

fig. 66



A la fin de l'expérience, on totalise séparément les coches de chaque colonne du bloc de Charlie. Comme dans l'expérience 25, les 2 totaux de Charlie sont sensiblement égaux.

Dans l'expérience 25, ce résultat venait du fait que toutes les phases de l'expérience résultaient d'un choix aléatoire (l'émission autant que les mesures). Ici, l'explication est plus subtile, car cette fois nous manipulons des particules intriquées. La vision quantique qui nous est maintenant familière veut que toute mesure faite par Alice ou Bob provoque l'effondrement des fonctions d'onde des deux particules de la paire. Quand Alice mesure sa particule, celle de Bob va immédiatement prendre la même valeur (en supposant que la mesure d'Alice précède celle de Bob). Traduit dans le dispositif optique que nous simulons, la particule de Bob se polarise selon le sens imposé par la mesure d'Alice. Alice et Bob n'obtiennent par conséquent le même résultat que si leurs filtres ont la même orientation, ce qui n'était pas le cas dans l'expérience 25.

Quand Alice et Bob se servent de deux mêmes angles perpendiculaires (ici:  $0^\circ$  et  $90^\circ$ ), on se trouve dans une situation particulièrement simple où seulement 2 cas se présentent, à fréquence égale:

- 1) Alice et Bob choisissent le même angle et leurs mesures sont identiques, soit corrélées à 100% (corrélation: +1).
- 2) Alice et Bob choisissent des angles perpendiculaires et leurs mesures sont différentes, soit anticorrélées à 100% (corrélation: -1).

Toutes les hypothèses prévoient cette corrélation globale de 0 mise en évidence par notre expérience.

## Expérience 27 - Les angles de Bell

Nous renoncerons ici à présenter dans leur écriture mathématique les **inégalités de Bell**. Nous nous contenterons de dire qu'elles représentent assez exactement le phénomène que nous venons d'observer dans les expériences 25 et 26. Dans le cadre de notre pratique, elles s'expriment de la manière suivante:

- 1) Une mesure d'Alice ne peut donner que 2 résultats: "Déteçté" ou "Non déteçté", avec exactement 50% de chances pour chaque résultat.
- 2) Il en va de même pour Bob.
- 3) Si les mesures sont indépendantes l'une de l'autre, la comparaison de leurs résultats doit révéler qu'elles sont à 50% différentes et à 50% identiques.

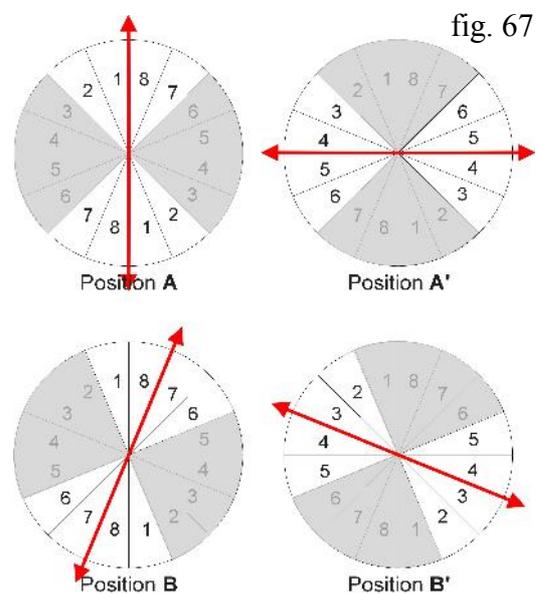
C'est ce que nous devrions observer selon l'hypothèse du réalisme local. Si la comparaison des résultats ne montre pas cette répartition 50% ; 50%, les inégalités de Bell sont violées, ce qui prouve la fausseté de l'hypothèse du réalisme local.

Le dispositif utilisé pour mettre en évidence une violation des inégalités de Bell utilise pour les deux détecteurs des couples d'angles différents. Notre matériel ne permet pas autant de souplesse qu'un dispositif optique, mais, par chance, il permet de simuler la situation pour les valeurs d'angle le plus souvent utilisées dans les variantes optiques de l'expérience: Alice aura comme dans les expériences précédente le choix entre les angles de polarisation de  $0^\circ$  et de  $90^\circ$  (fig. 67 - positions A et A'). Bob modifiera son équipement pour pouvoir choisir entre un angle de  $22,5^\circ$  et un angle de  $112,5^\circ$  (fig. 67 - positions B et B').

L'hypothèse des **variables cachées** rejette le concept d'état indéterminé. Les particules émises seraient en quelque sorte programmées d'avance et la mesure d'Alice ou de Bob n'aurait aucun effet sur la mesure de l'autre. Comme Alice et Bob choisissent l'orientation de leur filtre *après* l'émission de la particule, il faut que le "programme" des particules émises prévoie le résultat de chaque mesure envisageable. 16 "programmes" sont ainsi possibles (fig. 68). *Ils sont numérotés de "a" à "p" pour éviter une confusion avec nos particules, numérotées de "1" à "8".*

On repère les coïncidences des mesures entre Alice et Bob (fig. 69). Une coïncidence (les mesures d'Alice et de Bob donnent le même résultat) a une valeur de +1 (mesures corrélées). Des résultats différents correspondent à une anticorrélation, qui a une valeur de -1. La moyenne globale de 0 met en évidence le fait que les résultats des mesures d'Alice et Bob sont aussi souvent identiques que différents.

Dans l'expérience de Bell, on considère que si l'angle formé par les orientations des deux filtres de mesure est aigu, l'identité des résultats correspond à une corrélation. C'est le cas dans les situations A;B ( $22,5^\circ$ ), A';B ( $67,5^\circ$ ) et A';B' ( $22,5^\circ$ ). Si par contre l'angle est obtus, l'identité des résultats correspond à une anticorrélation. C'est le cas dans la situation A;B' ( $115,5^\circ$ ). Les valeurs ainsi corrigées sont représentées sur la fig. 70. Le tableau gagne en homogénéité, puisqu'il apparaît maintenant que la corrélation ne peut jamais dépasser en valeur absolue 0,5, quel que soit le "programme" de la particule. Comme chaque ligne du tableau comporte huit fois la valeur "+1" et huit fois la valeur "-1", l'inversion des valeurs de la ligne A;B' ne fausse pas les statistiques: la moyenne globale est toujours de 0. Pour respecter cette convention, Charlie devra donc utiliser un protocole de notation particulier quand les mesures d'Alice et Bob correspondront au cas A;B'.



En position:	+ : la particule sera détectée - : la particule ne sera pas détectée															
	programmation des particules															
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
A (0°)	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
A'(90°)	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+
B(22,5°)	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	-
B'(115,5°)	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-

fig. 68

Coïncidences constatées	+1 : mesures identiques -1 : mesures différentes															
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
A B	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1
A' B	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1
A' B'	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
A B'	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1
moyenne	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0

fig. 69

Coïncidences corrigées	+1 : mesures identiques -1 : mesures différentes															
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
A B	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1
A' B	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1
A' B'	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
A B'	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
moyenne	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5

fig. 70

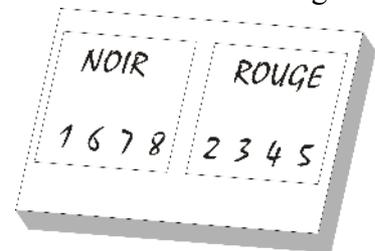
corrélation forte (coïncidence 3 fois sur 4)

corrélation faible (coïncidence 1 fois sur 4)

Les expérimentateurs reprennent le mécanisme de l'expérience 25, en y apportant les modifications suivantes:

1) Bob note sur son bloc le résumé de la règle correspondant aux nouvelles orientations de son filtre (22,5° et 112,5°), fig. 71.

fig. 71



2) Pour enregistrer les coïncidences des mesures, Charlie utilise un nouveau système pour tenir compte de l'inversion appliquée aux mesures A;B'.

Il prépare son bloc comme sur la fig. 72.



fig. 72

3) Avant de faire leur mesure, Alice et Bob annoncent à Charlie la teinte correspondant à l'orientation de leur filtre. Charlie

sait ainsi s'il devra éventuellement inverser le résultat de la comparaison entre les deux mesures. Si une des deux mesures au moins se fait selon l'orientation NOIR, Charlie mettra une coche dans la colonne correspondant au résultat. Si les deux mesures se font selon l'orientation ROUGE, il comptabilisera le résultat dans la colonne ne correspondant pas au résultat.

Tout ça est plutôt acrobatique, c'est vrai. Mais cette expérience ne va pas seulement servir à "vérifier" l'hypothèse des variables cachées, elle est destinée aussi à bien installer tous les gestes à accomplir sans erreur dans l'expérience 28 (la dernière consacrée aux inégalités de Bell), qui atteindra un maximum de complexité.

Passons à l'expérience:

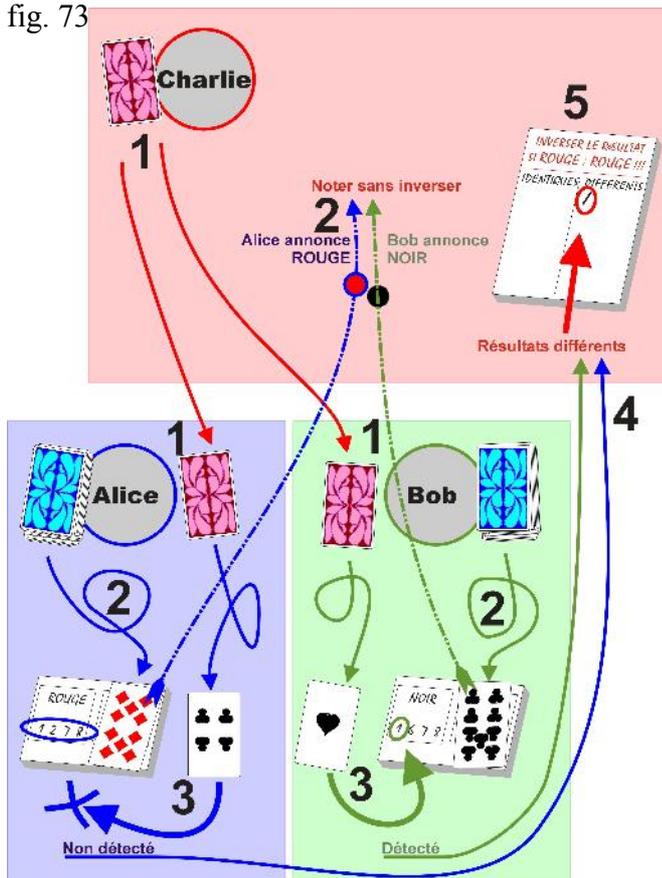
Bob reforme le jeu à dos *bleu* et le mélange. Il en répartit ensuite les cartes en deux tas de 26 cartes.

Charlie récupère les 32 cartes à dos *rose*, les mélange et pose le tas devant lui, faces cachées.  
 Bob passe à Alice un des deux tas de cartes à dos *bleu*. Alice et Bob préparent chacun son bloc résumant le comportement des filtres (fig. 59 et 71).

Nos amis vont maintenant effectuer 16 fois la série suivante de manipulations:

- 1) Charlie prend deux cartes sur son tas, sans laisser apparaître leur valeur. Il glisse une carte vers Alice et une carte vers Bob.
- 2) Alice et Bob prennent chacun une carte sur leur jeu à dos *bleu* et l'utilisent pour cacher une moitié de leur bloc, exactement comme d'habitude. Ils annoncent à Charlie la *teinte* de la carte qu'ils ont retournée. Si les deux cartes sont *rouges*, Charlie doit absolument se souvenir qu'il devra inverser le résultat en 5).
- 3) Alice et Bob retournent leur carte venant de Charlie et en comparent la valeur avec la liste visible sur leur bloc.
- 4) Alice et Bob annoncent leurs résultats ("Déecté" ou "Non détecté") à Charlie.
- 5) Si les résultats d'Alice et de Bob sont identiques, Charlie ajoute une coche dans la colonne "IDENTIQUES" de son bloc. Si Alice et Bob annoncent des résultats différents, il ajoute une coche à sa colonne "DIFFERENTS", sauf si, au point 2), les deux préposés aux mesures ont annoncé "ROUGE". Dans ce cas, Charlie ajoutera une coche dans la colonne "IDENTIQUES" si les résultats sont différents et une coche dans la colonne "DIFFERENTS" si les résultats sont identiques.

fig. 73



Dans l'exemple (fig. 73), Alice retourne une carte rouge et l'annonce à Charlie. Elle cache la partie NOIR de son bloc. Bob retourne une carte noire, l'annonce à Charlie et cache la partie ROUGE de son bloc. Alice a reçu de Charlie un "4". Elle n'a pas cette valeur sur sa liste visible. Elle annonce donc: "Non détecté". Bob a reçu de Charlie un "as". Cette valeur figurant sur sa liste visible, il annonce donc: "Déecté". Les deux résultats étant différents, Charlie ajoute une coche dans la colonne DIFFERENTS de son bloc, parce qu'il sait depuis 2) qu'il ne doit pas inverser le résultat.

A la fin de l'expérience, on totalise séparément les coches de chaque colonne du bloc de Charlie. Dans cette expérience encore, les totaux identiques ou presque conviennent aux tenants de toutes les hypothèses.

## Expérience 28 - L'expérience complète.

Nous y voici enfin! Cette fois, ce sont des particules corrélées qui seront émises, puis mesurées séparément par des expérimentateurs utilisant des filtres décalés de  $22,5^\circ$ . On utilisera pour noter les résultats de la comparaison des mesures la même convention que dans l'expérience 27. Ce dispositif simule le plus exactement possible le type d'installation utilisé en laboratoire.

Nos expérimentateurs préparent des paires intriquées comme dans l'expérience 26: les 32 cartes à dos roses sont mises par couples dans des enveloppes. Ceci nous donne 16 couples, ce qui est trop peu pour qu'apparaisse clairement le phénomène prédit par la mécanique quantique. Les cartes à dos *bleu* sont donc réunies et les 32 cartes de l'"as" au "8" en sont extraites. Avec ces cartes, 16 nouveaux couples sont formés. Charlie les ajoute aux 16 formés précédemment. Il mélange les 32 enveloppes et les pose devant lui.

Comme nous n'avons plus que 20 cartes à dos *bleu*, Alice va les prendre toutes et les utiliser lors de l'expérience pour tirer au sort le position de son filtre. Bob récupère les 20 cartes à dos *rose* mises de côté lors de l'expérience 24, pour en faire le même usage. Alice et Bob mélangent chacun leurs 20 cartes et les posent devant soi.

Alice et Bob utilisent les mêmes règles et donc les mêmes blocs que dans l'expérience 27.

Charlie trace une nouvelle feuille de marque, identique à celle de l'expérience 27.

On y va. Courage! Car nos expérimentateurs vont devoir effectuer **32 fois** la série suivante de manipulations:

1) Charlie prend une enveloppe sur son tas et en extrait les cartes, sans laisser apparaître leur valeur. Il glisse une carte vers Alice et une carte vers Bob.

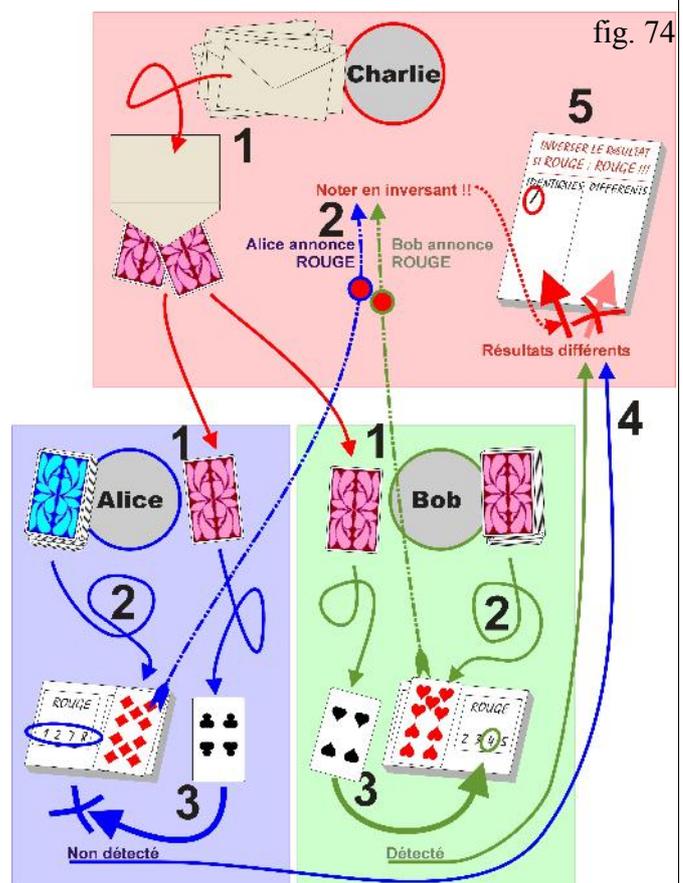
2) Alice et Bob prennent chacun une carte sur leur jeu (respectivement à dos *bleu* et *rose*) et l'utilisent pour cacher une moitié de leur bloc, exactement comme d'habitude. Ils annoncent à Charlie la *teinte* de la carte qu'ils ont retournée. **Si les deux cartes sont rouges, Charlie doit absolument se souvenir qu'il devra inverser le résultat en 5).**

3) Alice et Bob retournent leur carte venant de Charlie et en comparent la valeur avec la liste visible sur leur bloc.

4) Alice et Bob annoncent leurs résultats ("Détecté" ou "Non détecté") à Charlie.

5) Si les résultats d'Alice et de Bob sont identiques, Charlie ajoute une coche dans la colonne "IDENTIQUES" de son bloc. Si Alice et Bob annoncent des résultats différents, il ajoute une coche à sa colonne "DIFFERENTS", **sauf si, au point 2), les deux préposés aux mesures ont annoncé "ROUGE". Dans ce cas, il ajoutera une coche dans la colonne "IDENTIQUES" si les résultats sont différents et une coche dans la colonne "DIFFERENTS" si les résultats sont identiques.**

6) Si Alice et/ou Bob ont épuisé leur tas servant à tirer au sort l'orientation de leur filtre, ils reforment un nouveau tas avec les cartes écartées, en les mélangeant.



Dans l'exemple (fig. 74), Alice retourne une carte rouge et l'annonce à Charlie. Elle cache la partie NOIR de son bloc. Bob retourne une carte rouge, l'annonce à Charlie et cache la partie NOIR de son bloc. Alice a reçu de Charlie un "4". Elle n'a pas cette valeur sur sa liste visible. Elle annonce donc: "Non détecté". Bob a reçu de Charlie un "4" (corrélacion oblige!). Cette valeur figurant sur sa liste visible, il annonce donc: "Détecté". Les deux résultats sont différents. Mais comme Alice et Bob lui ont tous deux annoncé "ROUGE", Charlie doit enregistrer le résultat inverse: Il met donc une coche non pas dans la colonne DIFFERENTS mais dans la colonne IDENTIQUES.

Si l'expérience simule correctement le dispositif de laboratoire, les deux colonnes du bloc de Charlie devraient montrer une nette différence, mettant en évidence une corrélation supérieure à 50% entre les mesures d'Alice et de Bob<sup>41</sup>. Dans un cas idéal de notre dispositif, Charlie aurait consigné 20 IDENTIQUES et 12 DIFFERENTS<sup>42</sup>

Les "vraies" expériences s'entourent de précautions pour éviter des critiques venant des tenants du *réalisme local*. D'abord, on éloigne le plus possible le lieu de la mesure du lieu d'émission des particules et on décide le plus tard possible de l'orientation des filtres servant aux mesures. On ne peut pas penser alors qu'une mesure sur une particule influence la particule intriquée à travers le dispositif. L'effet à distance est par conséquent purement quantique. Dans notre expérience, nous prenons la même précaution: Alice et Bob sont en possession de la carte de Charlie avant d'orienter leur filtre. Les dispositifs de laboratoire évitent aussi les protocoles où les expérimentateurs choisissent à leur gré l'orientation de leur filtre, de peur qu'on soupçonne une connivence, même totalement inconsciente, entre les manipulateurs. Là aussi, nous sommes à l'abri de la critique, puisque nos expérimentateurs ont recours à un tirage au sort.

Voyons ce que pensent nos trois amis:

Alice: - Eh bien, tout ce travail a finalement effectivement permis de mettre en évidence une violation des inégalités de Bell. L'hypothèse simpliste des variables cachées est réfutée et les mesures sont bel et bien interdépendantes.

Mais Bob intervient: - Tu veux dire qu'il y a action à distance?

Alice: - Oui.

Bob éclate de rire: - Mais réveille-toi! Ce ne sont que des cartes à jouer!

Charlie s'en mêle: - C'est vrai, rien dans notre outillage ne vibre d'une mystérieuse superposition d'états, nos mesures n'émettent pas de signaux supraluminiques, nos cartes ne sont même pas des particules. Tout est réuni pour que notre expérience échoue! Et pourtant...

Bob: - Ça fonctionne. Parce que notre modèle est juste. Nous avons tout au cours de l'expérience respecté des protocoles qui dotaient nos pseudo-particules de vraies fonctions d'onde. Prenons un exemple: Alice oriente son filtre en A et détecte une particule. Les orientations possibles sont donc 1, 2, 7 ou 8. Avant la mesure d'Alice, ma particule était totalement floue, avec la même probabilité pour chacune des 8 orientations possibles. Mais la mesure d'Alice modifie la fonction d'onde de ma particule, qui ne peut maintenant plus que prendre les valeurs 1, 2, 7 ou 8. En examinant la règle du fonctionnement de mon filtre, on voit que j'ai 3 chances de détecter ma particule en position B contre une seule en position B'. L'effet à distance est

41 Théoriquement, notre simulation présente une corrélation de 0,625 (nous verrons à la fin des commentaires sur l'expérience comment on obtient cette valeur). L'expérience "en vrai", telle qu'elle est décrite par Bell, présente une corrélation de 0,653. Si ces valeurs étaient obtenues par des mesures, l'écart ne serait pas forcément significatif. Mais ici, ce sont des valeurs théoriques précises et leur divergence signifie que les deux descriptions ne sont pas compatibles. Le fait que nos filtres polarisants fonctionnent de manière plus abrupte que les vrais est peut-être une explication suffisante. Nous y reviendrons plus tard.

42 Comme nous ne faisons que 32 mesures, il serait futile d'espérer obtenir cette répartition 20;12. Les plus courageux d'entre vous répéteront l'expérience plusieurs fois en cumulant les totaux, mais c'est extrêmement fastidieux! En laboratoire, ce sont des milliers de photons qui sont comptabilisés.

évident.

Alice: - Ce n'est que l'imitation d'un effet à distance!

Bob: - Quand l'expérience de Bell est faite avec des particules dont on mesure le spin, j'accepte à la rigueur ta remarque. Mais quand les savants utilisent des paquets de lumière polarisée, c'est notre modèle qu'ils imitent: Au lieu de tirer des cartes ils orientent des filtres, mais la superposition d'états ne vient que de leur ignorance de la position du filtre au moment où la lumière le traverse!

Charlie, plutôt que de participer au débat, s'est plongé sur une page de son bloc, gribouillant de plus en plus frénétiquement. Le voilà qui s'écrie soudain: - Bob sang! J'ai l'explication!

**Le coup de gueule de Charlie:** - Bell prend les réalistes pour des imbéciles! Regardez le tableau qui prétend répertorier tous les comportements possibles des particules (fig. 68): Si on veut être vraiment réaliste, on ne répertorie que les comportements réellement possibles. Une particule ne peut être programmée que pour être détectée **soit** en position **A**, **soit** en position **A'**. Les colonnes a, b, j et k sont à éliminer puisqu'elles prévoient une détection dans les deux positions. Les colonnes d, e, f et o sont à éliminer aussi, puisqu'elles ne prévoient de détection ni en **A**, ni en **A'**. Le même raisonnement s'applique aux mesures **B; B'**. Au bout du compte, il ne reste que les colonnes c, g, l et m.

Mais Alice remarque: - Je veux bien, mais ça ne change rien! Si on regarde les moyennes de tes colonnes rescapées dans le tableau des coïncidences corrigées (fig. 70), on lit: +0,5, +0,5, -0,5, -0,5. La moyenne est la même que sur le tableau originel.

Mais Charlie ne s'avoue pas vaincu: - Je n'ai pas fini! On peut éliminer deux colonnes de plus: regardons le deuxième tableau (fig. 69). Puisqu'on ne s'intéresse pas aux mesures proprement dites mais seulement aux coïncidences, les colonnes **c** et **g** représentent deux fois le même comportement. Pareil pour **l** et **m**. Les deux colonnes **c** et **m** nous suffisent à décrire toute l'expérience.

Alice sourit: - Avec toujours la même moyenne...

Charlie: - Pas si vite. Parce que maintenant, nous allons répartir dans nos deux colonnes les 8 angles de polarisation également possibles de nos particules. Par exemple, la "1" est détectée en **A** et en **B**. Ce qui correspond au comportement **c**. J'ai dressé le tableau complet

(fig. 75):

fig. 75

Il y a trois fois plus de **c** que de **m**! Si je prends trois colonnes **c** et une colonne **m**, je totalise 10 "+1" et 6 "-1", ce qui correspond à un taux de réussite de 10 sur 16, soit 0,625. Le tableau des coïncidences corrigées de Bell est bidouillé! Tu parles, inverser la notation pour **A;B'** pour "harmoniser le tableau"! Le tableau des coïncidences constatées (fig. 69) est parfaitement "harmonieux" tel qu'il est quand on ne garde que les colonnes pertinentes. Dans l'expérience 7, on m'a traité de criminel parce que j'essayais prétendument de truquer des résultats. Mais quand c'est Bell, tout le monde trouve ça normal!<sup>43</sup>

Angle de polarisation	coïncidence en AB (et A'B')	coïncidence en AB' (et A/B)	Correspond à colonne:
1	x	-	<b>c</b>
2	-	x	<b>m</b>
3	x	-	<b>c</b>
4	x	-	<b>c</b>
5	x	-	<b>c</b>
6	-	x	<b>m</b>
7	x	-	<b>c</b>
8	x	-	<b>c</b>

Bob tente de calmer son ami: - Holà! Ne l'enterre pas trop vite! Ta démonstration est brillante, mais elle ne concerne que notre expérience. Il est peu probable que les "vraies" expériences se laissent démolir aussi facilement.

Alice remarque: - Tout ça est très troublant. Vous avez peut-être complètement tort tous les deux. N'empêche: Nous avons là une expérience déterministe qui donne précisément un résultat qui prouve que cette même expérience devrait donner le résultat contraire, c'est un cauchemar!

La conversation de nos trois amis semble avoir mis à mal l'expérience de Bell. Rassurons les adeptes de la mécanique quantique orthodoxe, l'affaire n'est pas pliée. Un argument de taille est à présenter en faveur de l'expérience de Bell: Si on fait l'expérience en décalant les filtres d'Alice et de Bob non plus de 22,5°, mais de 45°, Bell prédit une corrélation de 0,707. Notre simulation (exactement le même dispositif que dans l'expé-

43 Sans partager l'opinion de Charlie, il faut bien constater que si on ne note pas les coïncidences **A;B'** en les inversant, l'expérience ne viole pas les inégalités de Bell - Vous pouvez essayer.

rience 28, avec une nouvelle règle pour Bob: **B** (NOIR) correspond aux angles 5, 6, 7 et 8 et **B'** (ROUGE) aux angles 1, 2, 3 et 4) donne une valeur de 0,5. Essayez!

## Chapitre 6

### L'interféromètre de Mach-Zehnder

Le dispositif que nous avons utilisé dans le chapitre 5 peut à la rigueur passer pour un modèle reproduisant un équipement de laboratoire, du moins pour les tenants du réalisme. Mais le mécanisme en jeu dans le présent chapitre ne peut se réclamer d'aucune ressemblance avec un quelconque phénomène observé. Nous allons manipuler un automate, c'est à dire un ensemble d'objets programmés pour faire ce qu'on leur demande. Les expériences du chapitre fonctionnent parfaitement; non pas parce que notre modèle ressemble à la réalité, mais seulement parce que notre automate en donne l'illusion.

Nous avons évoqué la dualité onde-corpuscule à l'occasion de l'expérience 6. Un exemple spectaculaire de cette dualité est fourni par une expérience classique d'optique. Plutôt que de la décrire tout de suite, nous allons la découvrir par étapes, au fur et à mesure que nous construisons l'équipement nécessaire à sa simulation.

## Expérience 29 - Un miroir semi-réfléchissant

La définition est aussi simple que l'appellation: Un miroir semi-réfléchissant réfléchit la moitié de la lumière qu'il reçoit et laisse passer l'autre moitié. Dans le montage de la fig. 76, deux photomètres permettent de vérifier cette propriété: Ils reçoivent chacun la même quantité de lumière.

Si on considère la lumière comme une onde, on peut se contenter de la définition que nous venons de donner. Si on décrit le photon comme un corpuscule, on dira plutôt: Un miroir semi-réfléchissant laisse passer ou réfléchit au hasard un photon, avec une probabilité égale pour chacun des deux comportements.

Hasard, photons, nous sommes dans notre élément. Voyons ce que nous pouvons faire avec nos cartes...

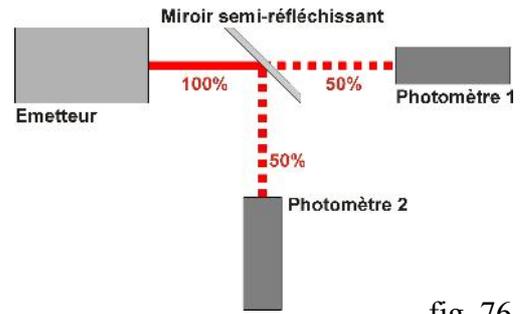


fig. 76



fig. 77

Pour toutes les expériences de ce chapitre, les cartes à dos *rose* nous serviront à construire notre appareillage. Les cartes à dos *bleu* seront nos particules.

Pour simuler le miroir semi-réfléchissant de la fig. 76, nous prenons deux cartes à dos *rose*: une *noire* et une *rouge*. Nous les posons dos à dos sur la table (fig. 77), peu importe dans quel sens. Nous repérons l'**entrée** et les **sorties** du miroir par 3 cartes à dos roses, posées faces cachées (fig. 78).

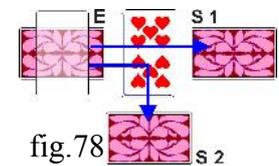


fig. 78

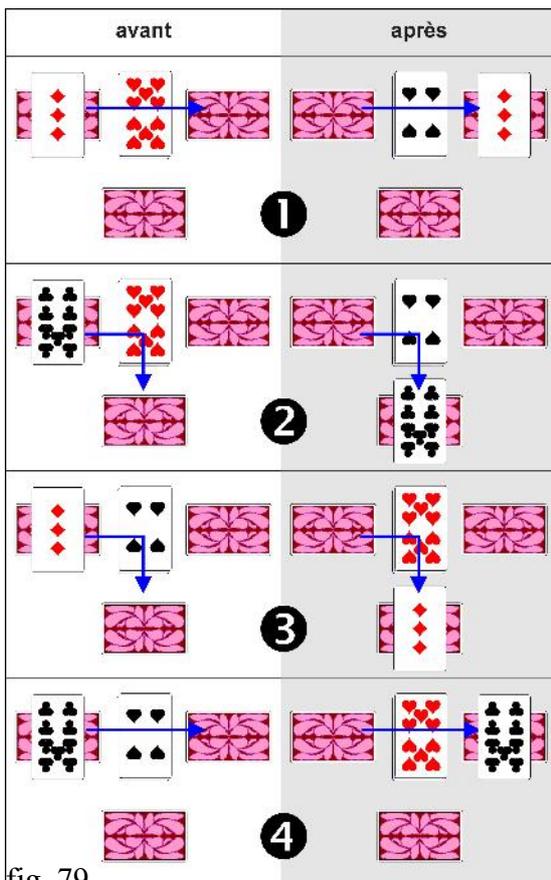


fig. 79

Trois règles suffisent à définir le comportement de notre miroir:

- 1) Quand une particule se présente à l'entrée, elle traverse le miroir sans être déviée **si la particule est de la même teinte que la carte visible du miroir.**
- 2) Quand une particule se présente à l'entrée, elle est déviée par le miroir **si la particule n'est pas de la même teinte que la carte visible du miroir.**
- 3) Dès que la particule vient de passer, les deux cartes du miroir sont retournées ensemble (la carte visible du miroir change donc de *teinte*).

La figure 79 montre les 4 cas possibles. Dans les cas 1 et 4, la particule a la même teinte que le miroir: elle n'est pas déviée. Dans les cas 2 et 3, la particule n'a pas la même teinte que le miroir: elle est déviée. Dès que la particule a passé, le miroir change de teinte (on retourne les deux cartes ensemble).

### Note très importante.

Tout le monde semble s'accorder que les miroirs semi-réfléchissants ont un comportement absolument aléatoire. Pour reproduire le phénomène, il suffirait de tirer au sort la destination d'une particule abordant le miroir. Cette simulation "réaliste" est malheureusement inutilisable dans cette série d'expériences

consacrée à l'interféromètre de Mach-Zehnder. Pire: le mécanisme que nous allons utiliser ne repose sur aucun modèle naturel. Les *teintes* de nos particules ne représentent aucune caractéristique physique réelle et le changement de teinte de notre miroir ne correspond en rien à un comportement observé sur un "vrai" miroir semi-réfléchissant. Nos miroirs ne sont que des automates qui créent une illusion.

Nous allons observer le fonctionnement de notre miroir et nous familiariser avec sa manipulation dans cette première expérience de la série:

On construit le dispositif de la fig. 80. Les cartes à dos *rose* ne seront jamais déplacées et parmi celles-ci, seules les cartes du miroir seront manipulées, mais ne bougeront pas de leur place.

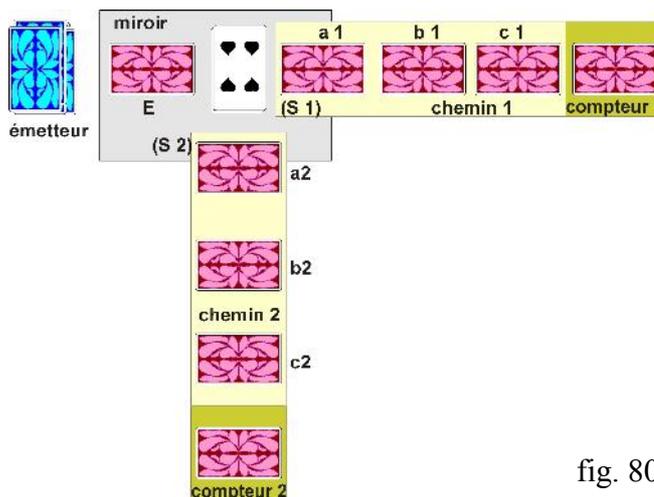


fig. 80

Les expérimentateurs s'installent de manière à pouvoir accéder aux éléments qui les concernent:

- Alice sera responsable de la zone miroir.
- Bob sera chargé de l'émission des particules. Il contrôlera aussi les manipulations d'Alice, pour deux bonnes raisons: D'abord parce qu'il manipulera lui-même un miroir similaire dans les expériences suivantes et ensuite parce qu'il est facile, au début, de se tromper (Bob veillera en particulier qu'Alice retourne bien les cartes du miroir après chaque passage d'une particule).
- Charlie déplacera les particules sur leurs chemins et les accumulera sur les compteurs.

Bob prend les cartes à dos *bleu* et les mélange. Il en compte 20, qu'il pose devant lui.

La suite d'actions suivante va être répétée 20 fois<sup>44</sup>:

- 1) Bob prend une carte sur son tas et la pose, face visible, sur l'entrée du miroir d'Alice.
- 2) Alice, en suivant les règles de comportement du miroir, transfère la carte de Bob sur une des deux sorties et retourne immédiatement les deux cartes (à dos *rose*) du miroir.
- 3) Charlie déplace d'un rang toutes les cartes (à dos *bleu*) se trouvant sur le chemin 1, en commençant par la carte la plus proche du compteur (Si, par exemple, des cartes se trouvent aux emplacements a1 et c1, la carte en c1 ira d'abord au compteur 1; ensuite, la carte en a1 ira en b1). Il fait avancer ensuite les cartes se trouvant sur le chemin 2, suivant le même protocole. Les cartes sur les compteurs ne sont plus manipulées et vont donc s'y accumuler.

A la fin de l'expérience, on vérifie que les deux compteurs ont reçu en gros le même nombre de particules. Le fait que les particules sur les compteurs se répartissent à peu près également entre les *teintes* montre que notre miroir a un comportement apparemment aléatoire. Mais rappelons une dernière fois que la *teinte* de nos particules ne correspond à aucune grandeur physique.

<sup>44</sup> Les plus courageux peuvent assurer un résultat statistique plus solide en faisant 52 fois la série de manipulation, avec le jeu à dos *bleu* entier. Mais c'est très fastidieux, et les expériences à venir seront longues...

### Expérience 30 - L'interféromètre asymétrique - onde ou corpuscule.

fig. 81

L'interféromètre de Mach-Zehnder utilise les éléments que nous venons d'étudier pour séparer un faisceau en deux voies, qui sont réunies ensuite sur un second miroir semi-réfléchissant, selon le schéma de la fig. 81. Ce second miroir ( fig. 81 B) fonctionne exactement comme celui que nous avons rencontré dans l'expérience 29, sauf qu'il a deux entrées. Notre simulateur a donc besoin d'une révision, assez simple. Il suffit d'ajouter une seconde entrée à notre modèle de miroir, ce qui est fait comme sur la fig. 82. Comme ce miroir se trouve en fin de parcours des particules, les sorties ont été remplacées par nos compteurs qui simulent les photomètres de la "vraie" expérience.

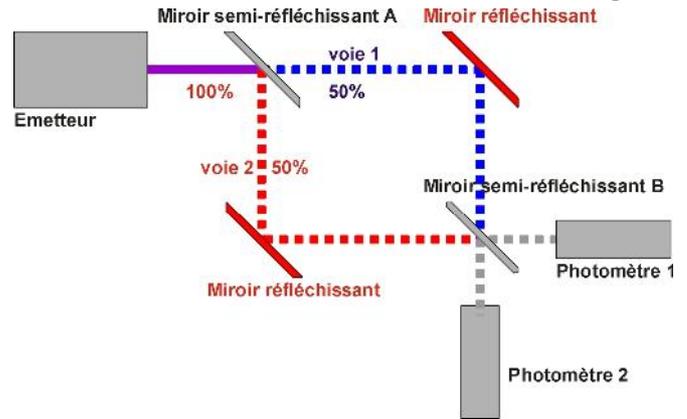
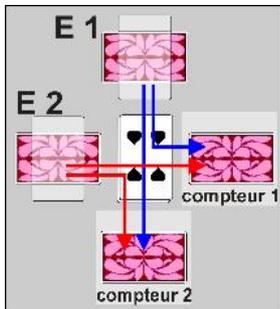


fig. 82



Les règles sont les mêmes que pour le premier miroir : Une particule qui se présente en E1 ou en E2 sera déviée si elle n'a pas la même teinte que la carte visible du miroir. Dans la situation de la fig. 82 (la carte visible est *noire*), une particule *rouge* en E1 va sur le compteur 1 et une carte *rouge* en E2 va sur le compteur 2. Si la particule qui se présente a la même teinte que la carte visible du miroir, elle passe tout droit. Sur la fig. 82, une particule *noire* en E1 va sur le compteur 2 et une particule *noire* en E2 va sur le compteur 1.

Des notions élémentaires de géométrie permettent de constater que sur le dispositif de la fig. 81, les voies 1 (en bleu) et 2 (en rouge) ont la même longueur totale. Une particule aura donc toujours exactement la même distance à parcourir entre le miroir semi-réfléchissant A et le miroir semi-réfléchissant B. Sur le dessin, cette égalité des distances semble une évidence. Dans la pratique en revanche, les dispositifs optiques doivent être ajustés avec un soin extrême pour atteindre la précision requise. Ce sera le sujet de notre expérience 31. Pour l'instant, nous nous intéressons au cas général où les deux voies sont inégales.

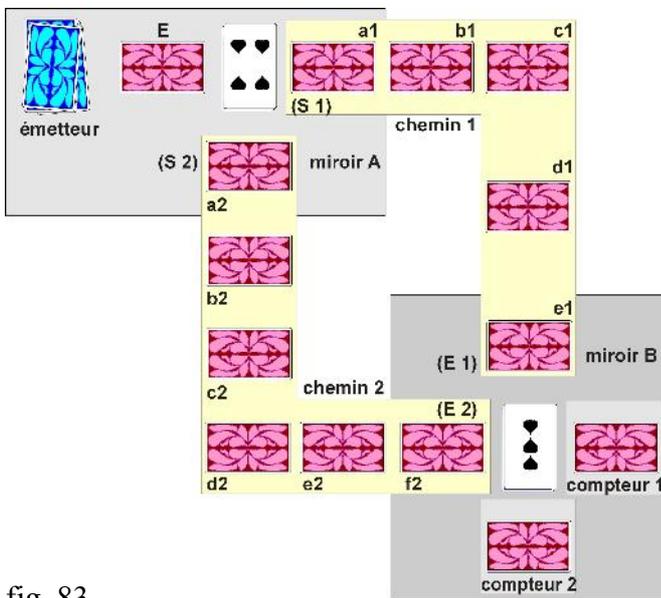


fig. 83

Notre appareil se présente comme sur la fig. 83. Le chemin 1 est plus court que le chemin 2. Comme nous n'avons que 3 manipulateurs, Alice cumulera les fonctions d'émetteur et de miroir A. Bob manipulera le miroir B et les compteurs. Charlie aura la tâche la plus ardue : déplacer les particules.

Les doubles cartes de deux miroirs sont préparées face *noire* visible. Alice rassemble les 52 cartes à dos *bleu* et les mélange soigneusement avant de les empiler devant elle, faces cachées<sup>45</sup>.

Jusqu'à ce que toutes les cartes à dos *bleu* aient atteint les compteurs, nos expérimentateurs vont effectuer la séquence de manipulations suivante :

<sup>45</sup> Les plus impatientes sont peut-être tentés de faire l'expérience avec moins de 52 cartes. Dans ce cas, il faut aussi qu'ils soient assez optimistes pour espérer obtenir un résultat acceptable. Parce que 52 itérations, c'est déjà très peu.

- 1) Tant que son tas à dos *bleu* n'est pas épuisé, Alice y prend la première carte (particule) et la considère comme entrant dans son miroir. Elle la pose en  $a_1$  ou en  $a_2$ , selon la règle, puis retourne la double carte de son miroir.
- 2) Charlie fait avancer les particules du chemin 1, selon le protocole utilisé dans l'expérience 29. Bob le surveille, prêt à corriger une éventuelle erreur.
- 3) Si une particule est en  $e_1$  (une entrée du miroir de Bob), Bob la pose sur un des compteurs, selon la règle des miroirs semi-réfléchissants et retourne immédiatement ensuite la double carte de son miroir.
- 4) Charlie fait avancer les particules du chemin 2, selon le protocole utilisé dans l'expérience 29. Sur ce chemin, c'est Alice qui le surveille.
- 5) Si une particule est en  $f_2$ , Bob la pose sur un des compteurs, selon la règle des miroirs semi-réfléchissants et retourne immédiatement ensuite la double carte de son miroir.

A la fin de l'expérience, on constate que les deux compteurs ont reçu des particules. Le nombre de particules impliquées est trop petit pour garantir que l'expérience montre une répartition presque égale entre les compteurs. Et même si on observe des totaux similaires, le petit nombre de particules impliquées ne permet pas de conclure à une égalité théorique. Contentons-nous de constater que les totaux de chaque compteur sont du même ordre de grandeur. Ce qui est parfaitement conforme aux observations faites au moyen d'un vrai interféromètre.

Les adeptes de la vision **corpusculaire** expliquent le résultat de la manière suivante: Le miroir A envoie aléatoirement la particule qu'il réceptionne dans une direction ou dans l'autre. Les particules voyagent donc soit sur le chemin 1, soit sur le chemin 2. Quand une particule arrive sur le miroir B, elle est aléatoirement envoyée vers le compteur 1 ou vers le compteur 2, peu importe d'où elle vient. Les deux compteurs reçoivent donc la même quantité de particules.

Les adeptes de la vision **ondulatoire** voient la chose autrement: Le miroir A partage le flux entrant de particules en deux voies. Le miroir B les réunit pour reconstituer l'onde de départ. Mais ceci n'est possible que si les deux chemins ont exactement la même longueur. La moindre asymétrie provoque un décalage entre les deux moitiés du flux et l'onde d'origine n'est pas reconstituée; les ondes venant de chaque chemin se comportent comme des entités séparées et chacune se voit partagée par le miroir en deux moitiés.

A ce stade, on peut donc considérer la lumière soit comme un flux de corpuscules, soit comme une onde. Deux théories coexistent et notre expérience 30 ne nous permet pas de les départager. Mais comme ces théories ne sont pas compatibles, l'une des deux devrait être fausse... mais laquelle?

### Expérience 31 - L'interféromètre symétrique - onde et corpuscule.

Avouons-le, nous sommes tous impatients de voir ce qui se passe quand les deux chemins de l'interféromètre sont d'égale longueur! Eh bien, allons-y!

Nous allons faire strictement la même chose que dans l'expérience 30, avec le montage de la fig. 84.

Inutile donc de décrire l'expérience. Un avertissement toutefois: Dans l'expérience 30, une petite étourderie pouvait ne pas avoir de graves conséquences. Dans cette expérience-ci, la moindre erreur de manipulation est fatale!

Laissons aux manipulateurs le temps qu'il leur faut pour réaliser l'expérience sans se presser...

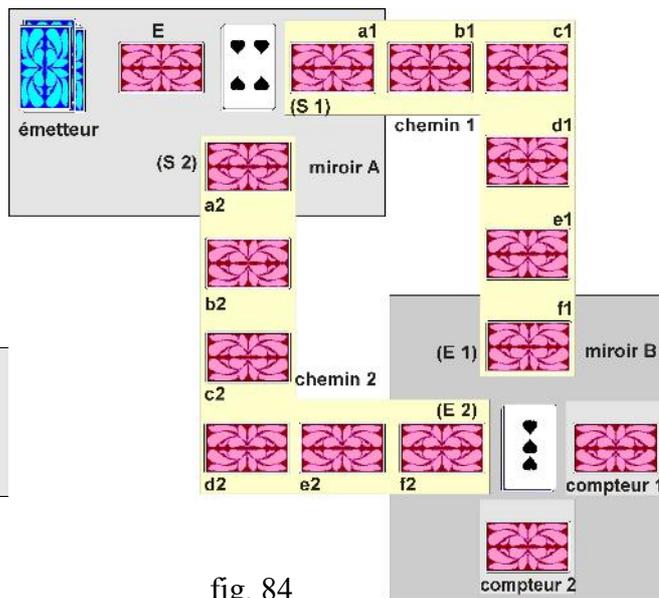


fig. 84

Si l'expérience s'est déroulée sans erreur, nous constatons que **toutes** les particules sont sur le compteur 2. Avec un interféromètre parfaitement ajusté, on constate le même phénomène. On en conclut donc que la lumière n'est pas corpusculaire, puisque dans ce cas, tout aurait dû se passer comme dans l'expérience 30!

Or, nous observons un résultat exactement conforme aux prédictions des tenants de l'hypothèse ondulatoire cités à la fin de l'expérience 30. La preuve est donc faite que la lumière est une onde. Le problème, c'est que nous tirons cette preuve d'une expérience faite avec... des corpuscules!

Par conséquent, la lumière est à la fois ondulatoire et corpusculaire. Cette **dualité onde-corpuscule** est un postulat de la mécanique quantique. Tout le monde ne s'en accomode pas...

Nous allons creuser un peu le sujet dans l'expérience suivante...

En pratique, pour mettre en évidence la spectaculaire différence de comportement de l'interféromètre selon les longueurs relatives des deux chemins, on se sert d'un dispositif permettant de faire varier à volonté la longueur d'un des chemins. Par exemple, en construisant le montage de la fig. 85. Avec un ensemble de deux miroirs montés sur une coulisse, on a un équipement très confortable. Ce genre de dispositifs à miroirs mobiles est largement utilisé dans certains procédés de transmission quantique de messages. On se sert alors d'un type particulier d'intrication entre les photons d'une paire, intrication basée sur un décalage temporel du photon par rapport à un instant de référence. Cette technique permet les plus grandes distances de transmission de messages. Nous n'avons

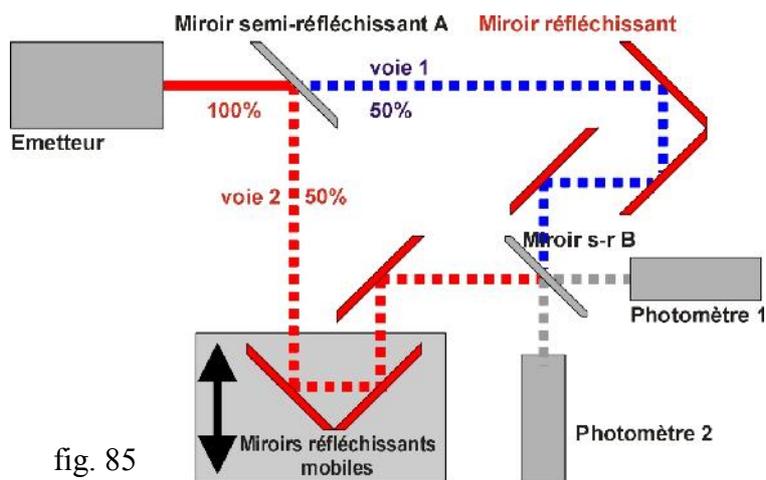


fig. 85

pas parlé de ce type d'intrication parce qu'elle est sujette à caution: On peut en effet estimer qu'il ne s'agit pas d'un phénomène strictement quantique. C'est la même critique qui peut être faite aux entités utilisées comme particules dans l'expérience de Bell, comme nous l'avons évoquée dans le chapitre 5.

## Expérience 32 - L'interféromètre symétrique - influence de la mesure.

Pour la dernière expérience de cette série, nous allons reprendre exactement le dispositif de l'expérience 31, auquel nous ajoutons un troisième compteur (fig. 86).

Nos expérimentateurs s'installent donc pour répéter à très peu de choses près les gestes de l'expérience 31.

Alice, après avoir mélangé ses cartes à dos *bleu*, les sépare en deux tas: un de 12 cartes et un de 40 cartes. Elle commencera l'expérience en prenant ses particules sur le tas de 12 cartes. Elle prendra toutes les suivantes sur l'autre tas.

Nos amis commencent l'expérience et la laissent se dérouler exactement comme l'expérience 31 jusqu'à ce qu'Alice fasse entrer dans son miroir sa douzième particule (la dernière de son tas de 12).

A partir de ce moment, Charlie fait avancer les particules du chemin 1 exactement comme il l'a fait auparavant; mais les particules du chemin 2, au lieu de les diriger vers le miroir de Bob, il les détourne et les fait échouer sur le compteur 3, jusqu'à la fin de l'expérience.

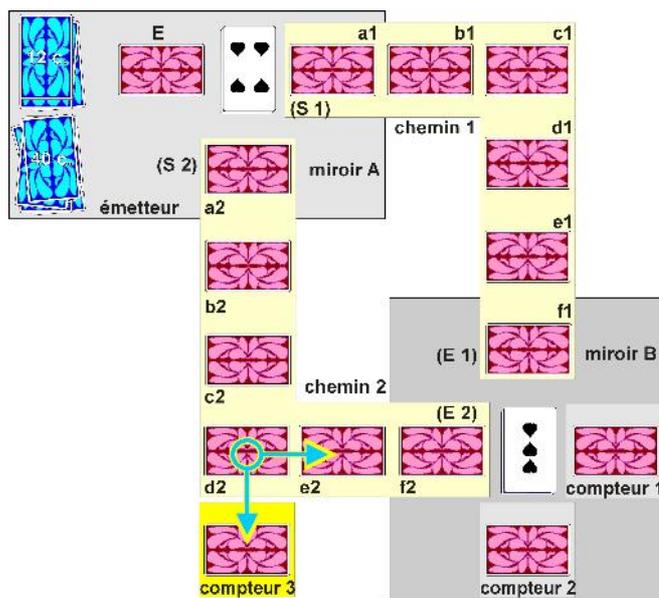


fig. 86

Qu'observe-t-on?

Tant que tout se passe comme dans l'expérience 31, les particules du chemin 1 sont toutes réfléchies par le miroir B pour aller sur le compteur 1. Mais dès que Charlie interrompt le flux du chemin 2, les particules du chemin 1 adoptent un comportement anarchique! Comment font-elles pour "savoir" qu'il se passe quelque chose de différent sur le chemin 2?

L'explication quantique qui est devenue traditionnelle est de considérer que les deux chemins sont parcourus en même temps par chaque particule. Les particules ne peuvent pas être considérées comme des corpuscules. Et une particule qui est en même temps sur deux chemins est forcément en superposition d'états.

L'expérience met en évidence une autre notion fondamentale de la mécanique quantique: l'influence de la mesure d'une particule sur l'ensemble d'une expérience. Cet effet est particulièrement évident ici: Le seul fait que Charlie mesure des particules (en les détournant sur le compteur 3) perturbe le comportement de particules qui ne semblent même pas concernées!

Si nous avons insisté, au début du chapitre, sur le fait que nos expériences impliquaient le recours à un automate, c'est pour nous préserver d'attribuer le moindre sérieux à l'interprétation suivante, qui ne repose sur aucun fait scientifique, mais que certains "réalistes", dans une démarche parfaitement antiscientifique, ne manqueront pas de faire:

Puisque le comportement de l'interféromètre peut être simulé par notre modèle, pourquoi ne pas chercher dans les vrais miroirs semi-réfléchissants un phénomène similaire aux nôtres? Si on n'a pas constaté cette particularité, c'est peut-être parce qu'on n'a jamais cherché... ce qui est surprenant, parce que si le comportement d'un miroir semi-réfléchissant n'est pas aléatoire, c'est tout un domaine du traitement de l'information qui s'ouvre!

Voilà un sujet qui va permettre à nos trois expérimentateurs de se disputer un moment avant de se quitter...

## Conclusion

Cet ouvrage ne comporte pas de bibliographie. Comme je l'ai précisé dans le prologue, je suis un amateur qui effleure à peine le domaine de la mécanique quantique. Je serais un pédant doublé d'un menteur si je vous proposais maintenant une liste de livres dont je n'aurais au mieux lu que quelques extraits! Les ouvrages sérieux ne manquent pas: les écrits des fondateurs de la mécanique quantique autant que les contributions des savants et penseurs d'aujourd'hui.

Si votre curiosité a été éveillée, ces quelques liens internet peuvent servir de débuts de pistes:

### **Pour approfondir (sites concernant strictement la mécanique quantique):**

<http://www.sciences.ch> (suivre le lien *atomistique*)

<http://www.techno-science.net> (lien *physique*, puis *glossaire*)

<http://www.geocities.com/crousse.geo/quantiq.html>

<http://www.savoirs.essonne.fr/dossiers/la-matiere/physique>

[http://www.universalis.fr/encyclopedie/P151471/QUANTIQUE\\_MECANIQUE\\_Proprietes\\_fondamentales.htm](http://www.universalis.fr/encyclopedie/P151471/QUANTIQUE_MECANIQUE_Proprietes_fondamentales.htm)

<http://www.sps.ens.fr/activites/Pierreduhem/2007-Bricmont-MQ1new.pdf>

<http://users.skynet.be/radoux/textes/quantique.pdf>

### **Curiosités (informations marginales, mais sérieuses):**

<http://www.futura-sciences.com>

<http://villemin.gerard.free.fr/Multimed/CalQuant.htm>

<http://semsci.u-strasbg.fr/ondicule.htm>

<http://florenaud.free.fr/Particules.php>

<http://fr.wikiversity.org/wiki>

<http://www.amessi.org/Choix-retarde-quand-la-mecanique>

<http://www.asmp.f/travaux/gpw/philosc/rapport2/5-Zwirn.pdf>

<http://charlatans.info/quantique.shtml>

### **Incongruités (sottises diverses, du moins selon mon opinion toute personnelle...):**

<http://www.psy-desirs.com/textes/spip.php?article1086>

<http://www.terredisrael.com/wordpress/?p=617>

<http://www.etchedorion.com/2006/03/06/la-verite-est-ailleurs/>

[http://noxmail.us/Syl20Jonathan/?page\\_id=296](http://noxmail.us/Syl20Jonathan/?page_id=296)

<http://mecaniqueuniverselle.net/amour-atome/introduction.php>

<http://quisommesnous.wordpress.com/philosophie-de-vie/la-mecanique-quantique/>

<http://www.rue89.com/infusion-de-sciences/2009/02/04/la-teleportation-un-voyage-en-mecanique-quantique>

In cauda venenum...

En donnant la parole à Alice, Bob et Charlie, j'ai évité d'exprimer une position personnelle. Ce que j'appelle par auto-dérision mon *Interprétation d'Alès* ne sera donc pas exposée ici. J'ai certes la conviction profonde qu'on perd beaucoup de temps et d'argent à téléporter des "particules" et à concevoir des ordinateurs quantiques, mais ce n'est que l'opinion marginale d'un amateur, qui ne dérangera pas les travaux des laboratoires sérieux...



"Hold your tongue!" said the Queen, turning purple.

"I wo'n't!" said Alice.

"Off with her head!" the Queen shouted at the top of her voice. Nobody moved.

"Who cares for you?" said Alice,  
(she had grown to her full size by this time).

"You're nothing but a pack of cards!"

At this the whole pack rose up into the air, and came flying down upon her.

"The Lewis Carroll - Sir John Tenniel 110th Anniversary 'Nursery Alice' Collection" - Printed by Graphische Anstalt J. E. Wolfensberger AG, Birsmenzdorf-Zürich, Switzerland - White Rabbit Press, Amsterdam © 2008

Passage de "Alice au pays des merveilles", chapitre 12 - Lewis Carroll  
1865 (illustration: John Tenniel)

**"Vous n'êtes rien qu'un paquet de cartes!"**

État du tapuscrit au 15.12.2011

Pour contacter l'auteur:

Blaise Muller  
36 chemin des Tabans  
F - 30100 Alès

mèl: [blaise.muller@9online.fr](mailto:blaise.muller@9online.fr)