



HAL
open science

Éléments Pour Une Interprétation Classique de la Mécanique Quantique

Stéphane Le Corre

► **To cite this version:**

Stéphane Le Corre. Éléments Pour Une Interprétation Classique de la Mécanique Quantique. 2021.
hal-03334412v2

HAL Id: hal-03334412

<https://hal.science/hal-03334412v2>

Preprint submitted on 7 Sep 2021 (v2), last revised 4 Nov 2021 (v5)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Éléments Pour Une Interprétation Réaliste et Classique de la Mécanique Quantique

Stéphane Le Corre, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Route Cantonale, 1015 Lausanne

Introduction

La mécanique quantique (MQ) est une théorie qui fonctionne exceptionnellement bien mathématiquement mais qui pose des problèmes d'interprétation physique. Ainsi il est par exemple difficile de fournir une interprétation physique à la fonction d'onde ainsi qu'à la non-localité de la mécanique quantique démontrée dans les expériences EPR (car jusqu'à ce jour elle implique nécessairement une transmission d'information instantanée ou du moins supérieure à la vitesse de la lumière). Dans cet article, nous allons démontrer la possibilité d'expliquer physiquement des expériences EPR qui violent effectivement les inégalités de Bell grâce à une simulation numérique. Cette solution va permettre de comprendre la violation de ces inégalités, de réinterpréter les résultats expérimentaux des expériences EPR (notamment des échappatoires qui prendront un sens nouveau), de fournir un nouveau regard sur la non-localité de la mécanique quantique (sans avoir recours à des transmissions d'informations supraluminiques) et potentiellement des éléments embryonnaires plus généraux d'interprétation de la MQ.

Nous commencerons par décrire les principes de la simulation proposée. Nous simulerons ensuite quelques expériences basiques de mécanique quantique pour valider notre modèle. Nous continuerons par la simulation des expériences de type EPR. Nous finirons par une analyse des éléments fondamentaux de notre modélisation.

Expérience EPR

Description de l'expérience

La simulation (expérience virtuelle) que nous allons proposer va permettre d'obtenir une violation systématique des inégalités de Bell. Contrairement aux théories à variables cachées, classiquement prévue pour ne pas violer ces inégalités (i.e. ne pas dépasser une valeur de 2), dans notre modèle, nous ne pourrions avoir que des valeurs supérieures à 2 (la violation prévue par la MQ étant d'environ 2.83). Voici le schéma de principe qui correspond à l'expérience EPR idéale que nous allons modéliser et simuler :

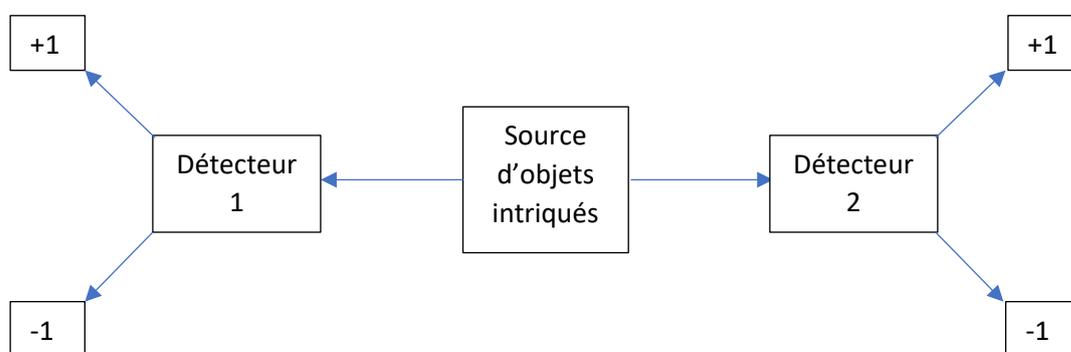


Fig.1 : Schéma de principe de l'expérience EPR idéale modélisée dans cette étude

Description de la source

Dans le cadre de notre simulation, la source va correspondre à la génération aléatoire non pas d'une direction mais d'un couple de directions quelconques. Chaque direction sera caractérisée par un angle compris entre 0° et 180° . Nous définirons tous ces angles par rapport à un référentiel absolu. La longueur du segment portant cette direction n'a pas d'importance dans notre expérience. On peut la supposer égale à 1. On peut ainsi représenter nos objets sources sous la forme de croix aux branches plus ou moins écartées (cf. Fig 2), les branches correspondant à des diamètres.

1^{ère} Remarque importante : Le fait que la source fournisse 2 caractéristiques pour un même objet source est le 1^{er} point important de cette modélisation. Nous le verrons plus loin, c'est certainement la clé de voûte de cette classe de modélisation.

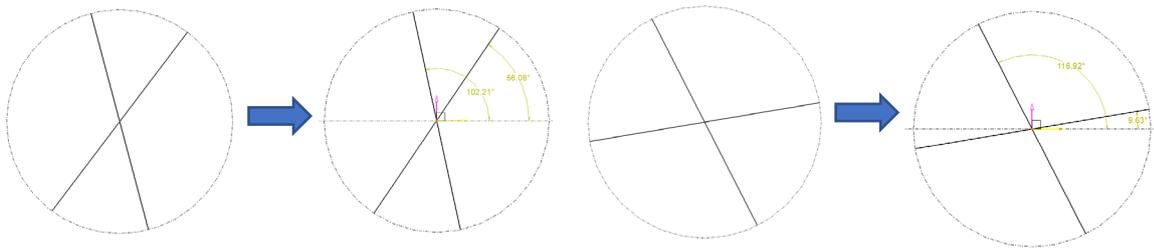


Fig.2 : Objets sources. Les angles indiqués correspondent aux angles des 2 directions par rapport au référentiel absolu

Description du détecteur

Un détecteur consistera symboliquement en 1 cercle divisé en 4 secteurs de 90° chacun (cf Fig.3) défini sur un référentiel fixé sur ce cercle. Les 4 secteurs dans ce référentiel sont donc toujours compris entre 0° et 90° pour le 1^{er} secteur, 90° et 180° pour le 2nd, 180° et 270° pour le 3^{ème} et 270° et 360° pour le 4^{ème}. On attribuera une valeur +1 au 1^{er} et 3^{ème} secteur et une valeur -1 au 2^{ème} et 4^{ème} secteur. Cette valeur va servir à définir la valeur de sortie du détecteur. L'orientation du détecteur sera définie dans le référentiel absolu mentionné auparavant (i.e. le même que pour les objets sources) par l'angle de son axe noté « 0° » sur la fig.3. Le détecteur analysera les 2 directions de l'objet source en appliquant la règle suivante :

Si les 2 directions de l'objet source se situent dans un ou deux secteurs de même valeur, le détecteur fournit en sortie la valeur du ou des secteurs.

2^{ème} Remarque importante : Cette règle permet à toute orientation du détecteur de fournir une valeur. Par contre, comme on peut le remarquer, cela signifie aussi que certains objets sources pourront ne pas fournir de valeur (ceux dont les directions se trouvent dans 2 secteurs différents) donc ne pas être détectés. Il s'agit là du 2nd point crucial de notre modélisation (conséquence directe de la « 1^{ère} Remarque importante » précédente).

Etant donné que les non détections sont certainement le point le plus délicat au 1^{er} abord à accepter, nous leur consacrerons un chapitre dédié dans lequel nous montrerons qu'elles :

- Sont impossibles à éviter
- Ne peuvent correspondre non plus à une 3^{ème} valeur (qui compléterait les sorties possibles « +1 » et « -1 »)
- Sont d'un autre type que les échappatoires des expériences EPR réelles

Les 2 remarques importantes précédentes seront les caractéristiques fondamentales de la classe de modélisation représentée par le modèle que nous allons étudier. Mais continuons de décrire notre modélisation.

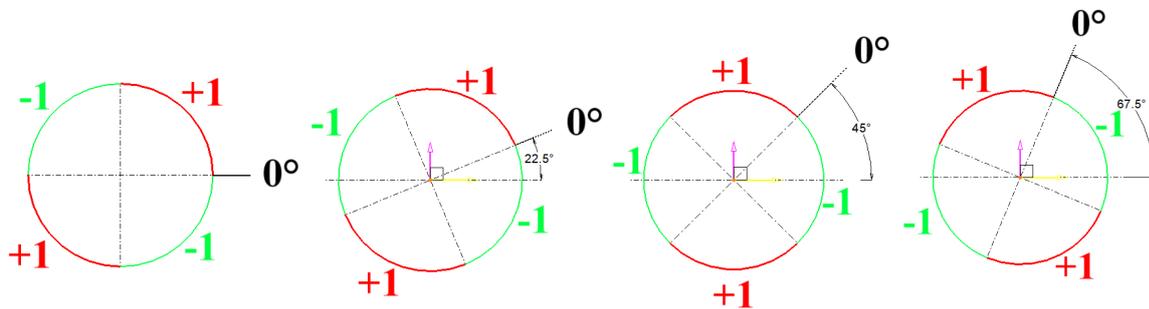


Fig.3 : Détecteurs. Division en 4 secteurs pouvant donner les valeurs de détection « +1 » ou « -1 ». Les exemples d'angles indiqués (22.5°, 45° et 67.5°) correspondent aux angles du détecteur par rapport au référentiel absolu.

Modélisation numérique de la source

Nos objets sources se réduisent à la connaissance d'un couple de direction. Pour cela, on déterminera la 1^{ère} direction du couple en choisissant aléatoirement un 1^{er} angle entre 0° et 180° par rapport au référentiel absolu. On choisira ensuite aléatoirement un second angle entre 0° et 180° pour déterminer l'écart de la 2^{nde} direction à la 1^{ère} direction. Ce second angle sera donc ajouté à l'angle de la 1^{ère} direction pour définir la 2^{nde} direction. On aurait très bien pu directement définir le 2nd angle de la même manière que la 2^{nde} direction (et cela n'aurait rien changé aux résultats présentés dans cet article). Nous définissons le 2nd élément du couple plutôt comme l'écart à la 1^{ère} direction car nos expériences vont montrer que l'écartement est un paramètre structurant de notre modélisation. En effet, les différentes valeurs de violation des inégalités de Bell seront fonction de ce paramètre. Cette représentation du couple sera donc plus pertinente. De plus, cela nous permettra une interprétation physique de ces objets sources à la fin de cet article.

Commençons d'abord par vérifier les statistiques attendues d'expériences de base.

Expérience avec 1 détecteur dont l'orientation est aléatoire à chaque essai (cf. fichier « 01-UN Détecteur orienté aléatoirement.xlsx ») :

Concrètement, voici l'implémentation de l'orientation du détecteur (colonne D) et de la définition des objets sources, 1^{ère} direction (colonne E) et écartement (colonne F) dans un tableur. La ligne 1 donne les formules utilisées :

	A	B	C	D	E	F
1	Valeur maximale de l'évasement		Comptage du nombre d'essais	ALEA()*180	ALEA()*180	MOD(E3+ALEA()*\$A\$3;180)
2	Evasement max		Nb Essai	Angle Détecteur1 / Ref Abs	Sablier Angle Bord Droit / Ref Abs	Sablier Angle Bord Gauche / Ref Abs
3	0		1	170.937523	166.2141571	166.2141571

Tab.1

Le rôle du modulo (dans la définition de la 2^{nde} direction, colonne F) est de fournir une définition du couple dans le demi-cercle supérieur. Lorsque l'angle définissant la 2^{nde} direction (somme de l'angle définissant la position de la 1^{ère} direction et de l'écartement) dépasse les 180°, la 2^{nde} direction (trait

rouge avant modulo sur la Fig.4) se définit alors par sa demi-droite (trait bleu après modulo) contenue dans le demi-cercle supérieur (Fig.4) :

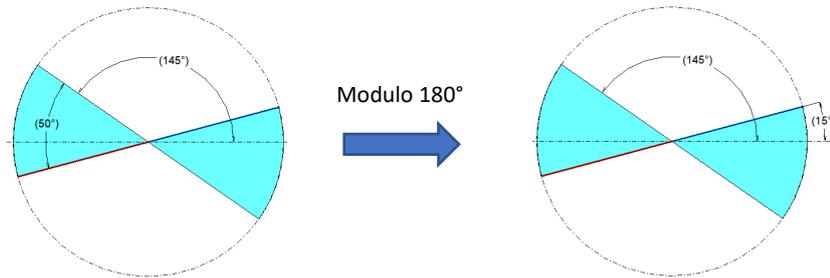


Fig.4 : L'objet source défini par (145° ;145°+50°=195°) est redéfini par (145° ;15°).

Ainsi tout couple de direction a 2 manières de se définir, par exemple (1^{ère} dir=145° ; Ecart=50°) qui sera traduit en (1^{ère} dir=145° ; 2^{nde} dir=15°) ou (1^{ère} dir=15° ; Ecart=130°) qui se traduit en (1^{ère} dir=15° ; 2^{nde} dir=145°). Ce « doublonnage » n'a pas de conséquence sur les statistiques car il est partagé par tous les objets sources.

Pour l'analyse dans le détecteur, nous convertissons les 2 directions de l'objet source dans le référentiel du détecteur (colonne G et colonne H) en retirant l'orientation du détecteur (l'axe 0° de la Fig.3). Ensuite, nous regardons dans quels secteurs ces 2 directions se trouvent pour obtenir le résultat « +1 » ou « -1 » (colonne I) qui correspond à la règle mentionnée précédemment. L'implémentation utilisée est indiquée en ligne 1 :

G	H	I
MOD(E3-D3;180)	MOD(F3-D3;180)	SI(ET(G3<90;H3<90);1;SI(ET(G3>90;H3>90);-1;""))
Sablier Angle Bord Droit / Detecteur1	Sablier Angle Bord Gauche / Detecteur1	Resultat
175.276634	175.276634	-1

Tab.2

Pour analyser les résultats du détecteur, nous comptons séparément les « +1 » (colonne J et O), les « -1 » (colonne K et P) et le nombre d'évènements détectés, i.e. donnant un résultat (colonne N). Pour information, nous comptons aussi le nombre d'essais (colonne L) et le nombre d'évènements non-détectés (colonne M). En voici l'implémentation :

J	K	L	M	N	O	P
SI(I3=1;1;"")	SI(I3=-1;1;"")	SOMME(C:C)	L3-N3	SOMME(J:K)	SOMME(J:J)/N3	SOMME(K:K)/N3
Nb résultat "+1"	Nb résultat "-1"	Nb Essai	Nb Evt Non-Det	Nb Evènement Détecté	Probabilité d'avoir un résultat "+1"	Probabilité d'avoir un résultat "-1"
	1	5500	0	5500	0.499818182	0.500181818

Tab.3

Pour un choix aléatoire de l'orientation du détecteur, nous obtenons toujours une probabilité de 0.5 d'avoir « +1 » et 0.5 d'avoir « -1 » et quelque soit la plage d'évasement des directions (Tab.4) en accord avec les résultats attendus de la MQ :

Evasement max	Nb Evt Non-Det	Nb Evènement Détecté	Evasement max	Probabilité d'avoir un résultat "+1"	Probabilité d'avoir un résultat "-1"	% Evt Non-Det	% Evènement Détecté
0	0	5500	0	0.492	0.508	0	1
10	295	5205	10	0.51162344	0.48837656	0.05363636	0.94636364
20	605	4895	20	0.513381	0.486619	0.11	0.89
30	932	4568	30	0.51050788	0.48949212	0.16945455	0.83054545
40	1268	4232	40	0.50047259	0.49952741	0.23054545	0.76945455
50	1521	3979	50	0.49208344	0.50791656	0.27654545	0.72345455
60	1839	3661	60	0.49685878	0.50314122	0.33436364	0.66563636
70	2127	3373	70	0.49747999	0.50252001	0.38672727	0.61327273
80	2457	3043	80	0.49687808	0.50312192	0.44672727	0.55327273
90	2762	2738	90	0.49671293	0.50328707	0.50218182	0.49781818
100	3016	2484	100	0.50322061	0.49677939	0.54836364	0.45163636
110	3161	2339	110	0.48140231	0.51859769	0.57472727	0.42527273
120	3304	2196	120	0.48679417	0.51320583	0.60072727	0.39927273
130	3241	2259	130	0.50110668	0.49889332	0.58927273	0.41072727
140	3127	2373	140	0.49093974	0.50906026	0.56854545	0.43145455
150	3133	2367	150	0.50443599	0.49556401	0.56963636	0.43036364
160	3049	2451	160	0.48959608	0.51040392	0.55436364	0.44563636
170	2905	2595	170	0.49325626	0.50674374	0.52818182	0.47181818
180	2720	2780	180	0.50359712	0.49640288	0.49454545	0.50545455

Tab.4

Expérience avec 1 détecteur dont l'orientation est fixe à chaque essai (cf. fichier « 02-UN Détecteur orienté selon UNE direction.xlsx ») :

Nous obtenons les mêmes résultats si l'orientation du détecteur est fixe pour tous les essais (Tab.5) en accord avec les résultats attendus de la MQ :

Evasement max	Nb Evt Non-Det	Nb Evènement Détecté	Probabilité d'avoir un résultat "+1"	Probabilité d'avoir un résultat "-1"	% Evt Non-Det	% Evènement Détecté
0	0	5500	0.49290909	0.50709091	0	1
10	323	5177	0.50222136	0.49777864	0.05872727	0.94127273
20	608	4892	0.50122649	0.49877351	0.11054545	0.88945455
30	889	4611	0.50054218	0.49945782	0.16163636	0.83836364
40	1173	4327	0.49965334	0.50034666	0.21327273	0.78672727
50	1547	3953	0.48874273	0.51125727	0.28127273	0.71872727
60	1867	3633	0.50068814	0.49931186	0.33945455	0.66054545
70	2146	3354	0.50119261	0.49880739	0.39018182	0.60981818
80	2457	3043	0.49983569	0.50016431	0.44672727	0.55327273
90	2718	2782	0.50611071	0.49388929	0.49418182	0.50581818
100	3017	2483	0.50302054	0.49697946	0.54854545	0.45145455
110	3094	2406	0.52036575	0.47963425	0.56254545	0.43745455
120	3233	2267	0.5094839	0.4905161	0.58781818	0.41218182
130	3244	2256	0.47916667	0.52083333	0.58981818	0.41018182
140	3212	2288	0.50568182	0.49431818	0.584	0.416
150	3047	2453	0.51773339	0.48226661	0.554	0.446
160	3055	2445	0.49570552	0.50429448	0.55545455	0.44454545
170	2920	2580	0.48139535	0.51860465	0.53090909	0.46909091
180	2730	2770	0.50216606	0.49783394	0.49636364	0.50363636

Tab.5

L'avantage d'une simulation numérique d'une expérience EPR est que l'on peut étudier les évènements non-détectés. Sur la Fig. 5, on a indiqué le nombre d'évènements non-détectés et détectés pour les comparer. On notera, comme nous en discuterons plus loin, que tant que l'évasement n'est pas nul, on obtient toujours des non-détectés. Comme nous le verrons plus loin, ces non-détectés ne sont pas de même nature que les échappatoires des résultats expérimentaux :

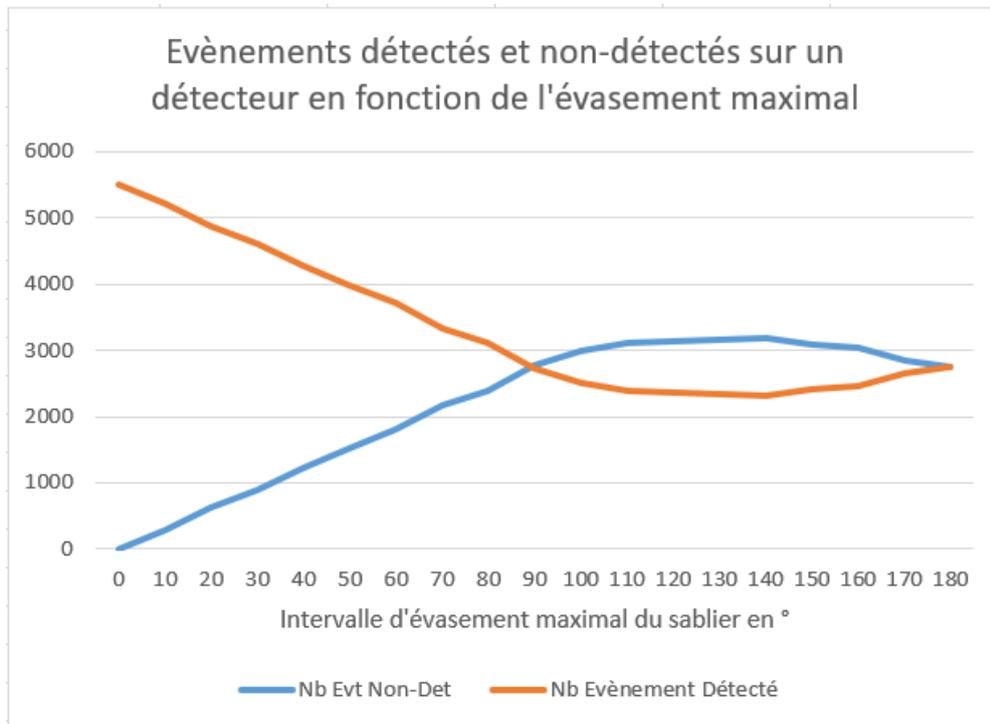


Fig.5 : Comparaison de la cardinalité des ensembles d'évènements détectés et non détectés.

Expérience avec 2 détecteurs, un à orientation fixe et un dont l'orientation varie (cf. fichier « 03-DEUX Détecteurs orientés selon DEUX directions.xlsx ») :

Un autre avantage d'une simulation numérique est que les objets détectés ne sont ni détruits ni modifiés. Nous pouvons donc les analyser à nouveau après une 1^{ère} détection. Sur la Fig.6, nous avons d'abord fait passer les objets sources dans un 1^{er} détecteur et ensuite nous avons fait passer dans un 2nd détecteur seulement ceux qui avait donné le résultat « +1 ». Ce même ensemble d'objet source donnant « +1 » a été redirigé sur différent 2nd détecteur pour analyser cet ensemble en fonction de l'orientation d'un détecteur. C'est comme si on démultipliait le photon détecté dans son état initial pour que ce même photon soit étudié sur plusieurs détecteurs d'orientation différente :

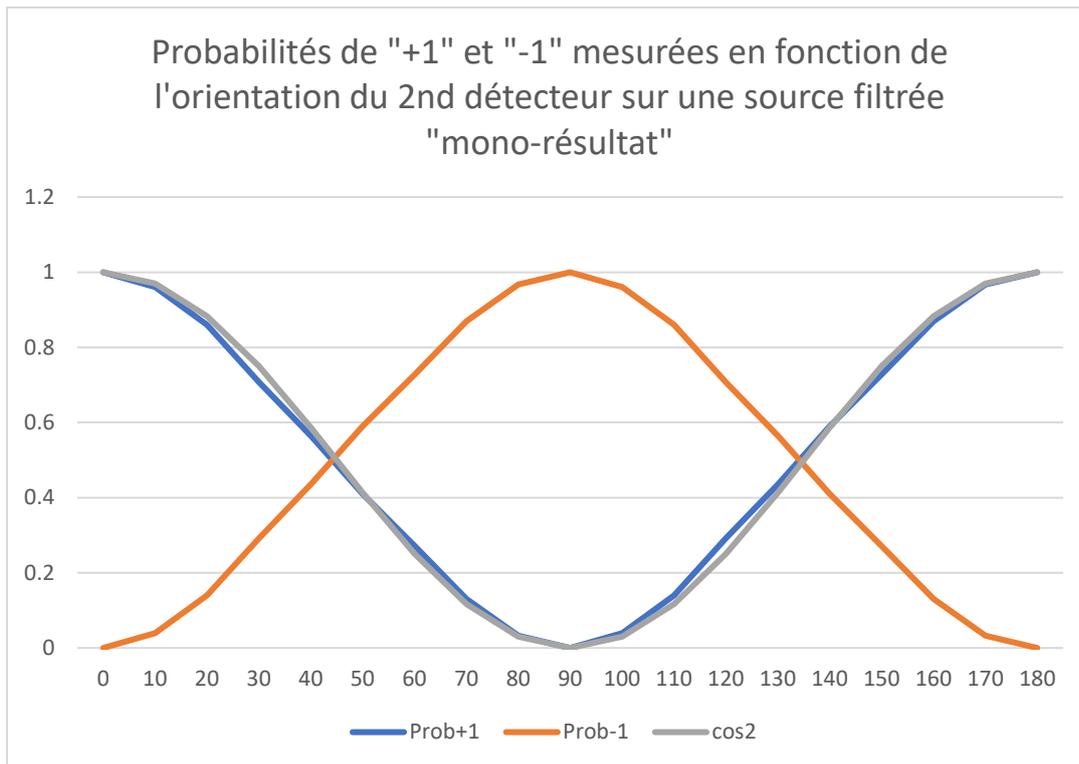


Fig.6

La courbe grise représente le « $\cos^2 \alpha$ » de l'angle α d'orientation du détecteur. Elle se superpose très bien sur la distribution de probabilité de mesurer « +1 » pour notre expérience, en accord avec les mesures obtenues par la mécanique quantique. Cette distribution en cosinus se comprend car un couple de direction avec un écartement proche des 90° aura très peu d'orientations possibles pour passer dans un seul secteur alors qu'avec un écartement très faible aura beaucoup d'orientations possibles pour passer dans un même secteur. Ainsi le filtrage n'est pas linéaire.

1^{ère} Expérience EPR (cf. fichier « 04-Intrication E(a,b).xlsx ») :

Continuons maintenant en vérifiant que notre modèle vérifie les statistiques attendues pour $E(a, b) = P_{++}(a, b) + P_{--}(a, b) - P_{+-}(a, b) - P_{-+}(a, b)$ dans une expérience de type EPR. Pour cela nous reprenons notre expérience sur 1 détecteur et nous envoyons le même objet source sur un 2nd détecteur orienté indépendamment du 1^{er}. L'intrication est ainsi modélisée par une source dupliquée à l'identique qui correspondrait aux états quantiques traditionnellement notés $|\uparrow\uparrow\rangle$ ou $|\rightarrow\rightarrow\rangle$. On effectue l'analyse des corrélations sur les résultats des 2 détecteurs en décomptant les résultats {« +1 » ; « +1 »}, {« -1 » ; « -1 »}, {« +1 » ; « -1 »} et {« -1 » ; « +1 »} (colonne Z, AA, AB et AC). Leurs probabilités (colonne AJ, AK, AL et AM) sont obtenues en se basant sur les événements détectés (colonne AI). Pour information, on compte aussi les événements non-détectés (colonne AF et AG) :

Z	AA	AB	AC	A AI	AF	AG
SI(ET(I3=1;S3=1);1;"")	SI(ET(I3=-1;S3=-1);1;"")	SI(ET(I3=1;S3=-1);1;"")	SI(ET(I3=-1;S3=1);1;"")			SOMME(AF:AF)
Nb++	Nb--	Nb+-	Nb-+		Evt Non-Dect	Nb Evt Non-Dect
					1	2727

AI	AJ	AK	AL	AM	AN
SOMME(Z:AC)	SOMME(Z:Z)/AI3	SOMME(AA:AA)/AI3	SOMME(AB:AB)/AI3	SOMME(AC:AC)/AI3	AJ3+AK3-AL3-AM3
Nb Evt Détecté	Prob++	Prob--	Prob+-	Prob+-	E(a,b)
2772	0.486652237	0.513347763	0	0	1

Tab.6

Voici les résultats obtenus pour une valeur d'évasement maximale de 30° des objets sources. La courbe verte est la courbe théorique attendue par la mécanique quantique, $E(a, b) = \cos(2\theta)$, avec θ la différence d'orientation des 2 détecteurs (Fig.7) :

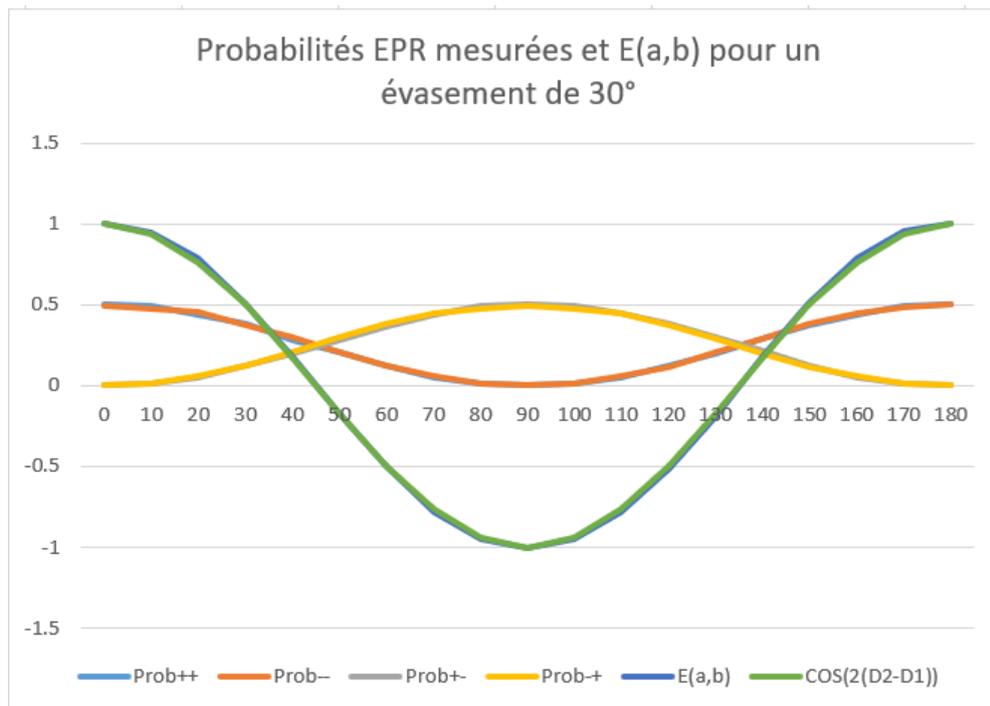


Fig.7

On notera le très bon accord entre notre modèle et la théorie car on distingue difficilement les 2 courbes verte (théorique) et bleue (mesurée). C'est la raison de notre choix de couple de direction d'évasement maximale de 30° pour la Fig.7.

Notre modèle nous permet des écarts qui conduisent à une violation des inégalités de Bell par valeurs supérieures à celles prévues par la MQ, pour d'autres valeurs d'évasement des objets sources (Fig.8 et Fig.9) :

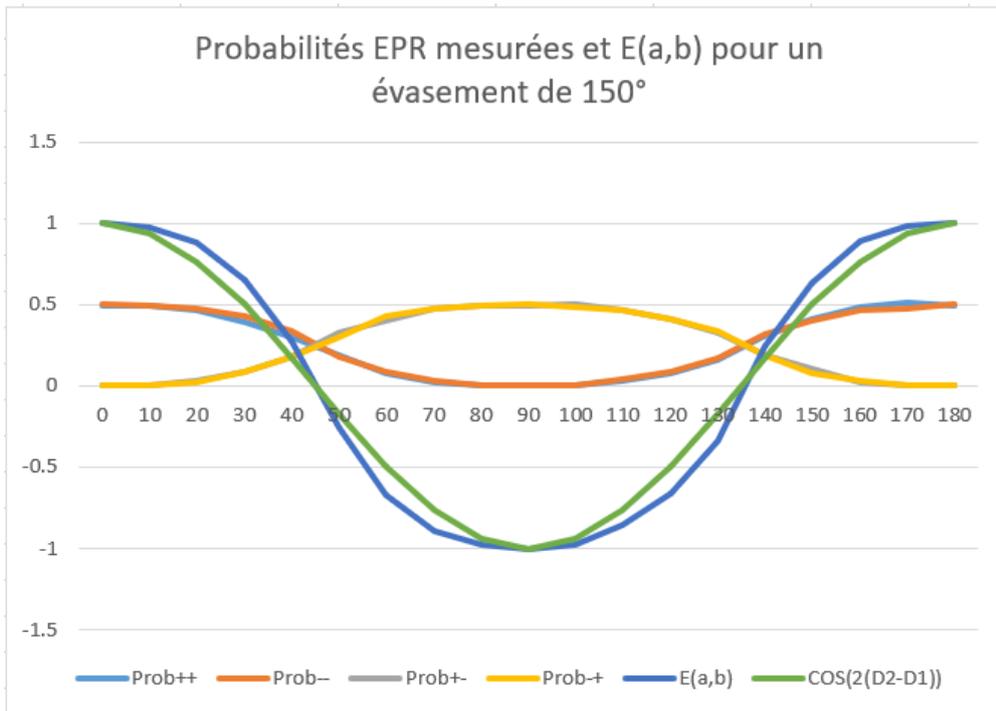


Fig.8

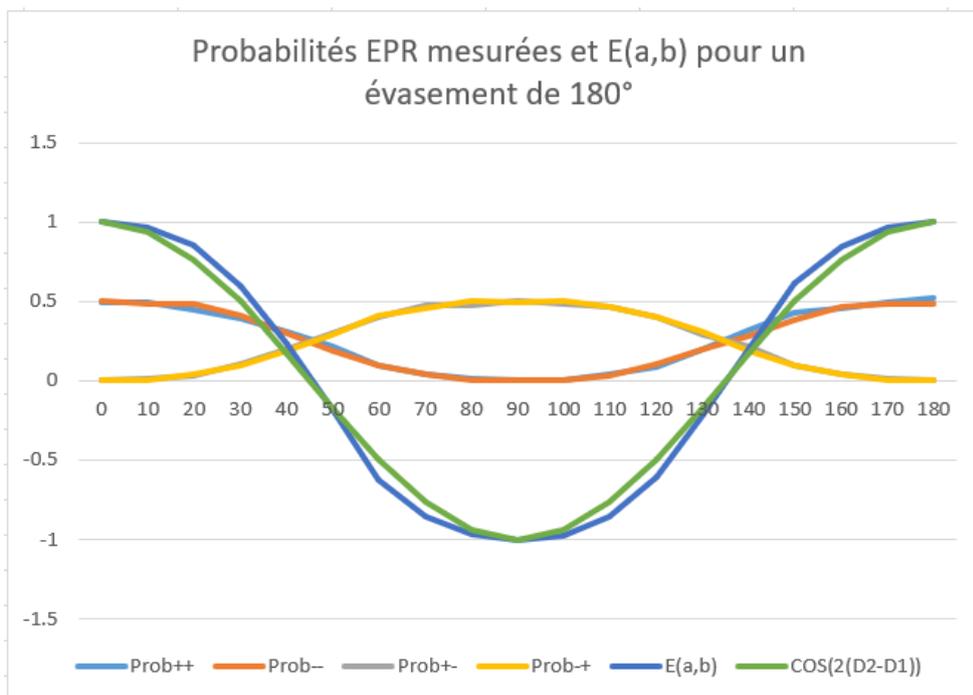


Fig.9

Ou une violation des inégalités de Bell par valeurs inférieures à celles prévues par la MQ, pour d'autres valeurs d'évasement des objets sources (Fig.10) :

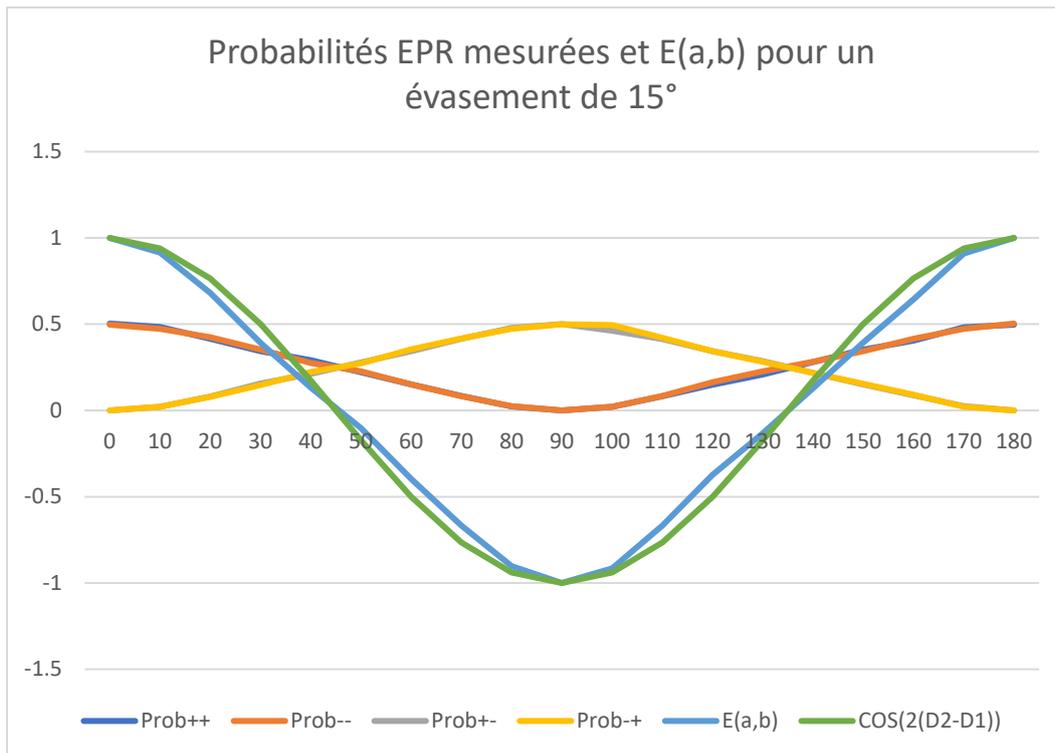


Fig.10

Enfin, lorsque l'on réduit notre objet étendu (couple de directions non colinéaires) à un simple vecteur (couple de directions colinéaires) par un évasement maximal de 0° des objets sources, on retombe sur le cas classique qui ne viole pas les inégalités de Bell (Fig.11) :

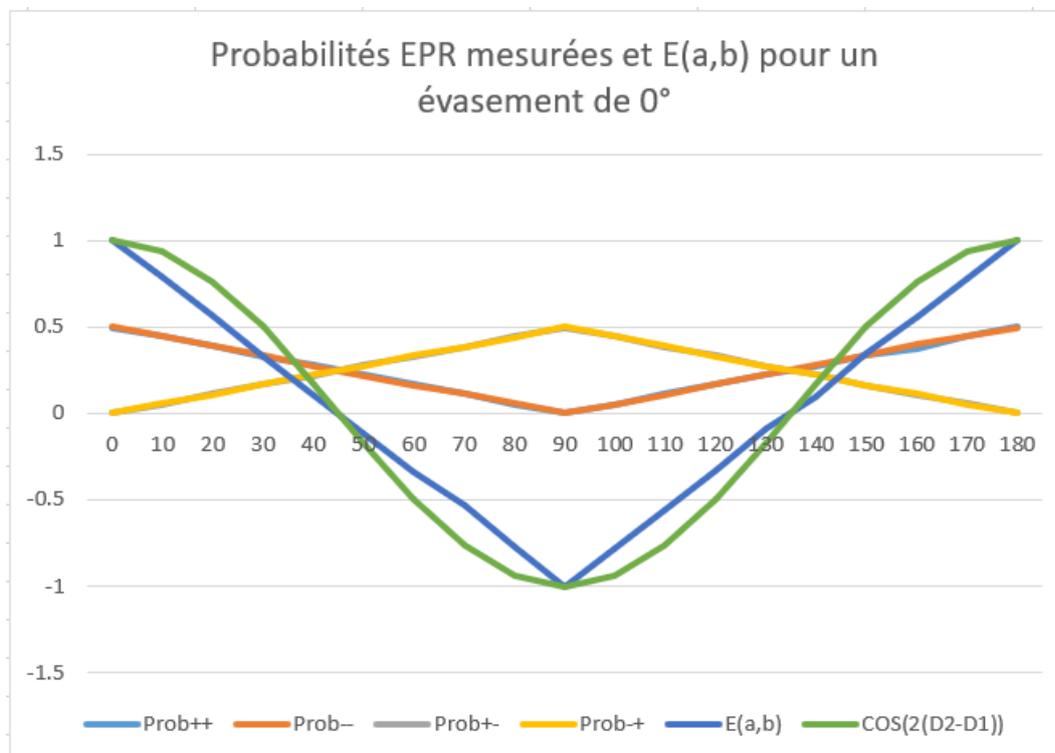


Fig.11

Remarque : La simulation permet aisément de vérifier que notre modèle est bien isotrope. On obtient les mêmes résultats, pour une même différence d'angle des 2 détecteurs quelque soit leur

orientation mutuelle (par exemple, les statistiques sont les mêmes pour $\{D1=0^\circ, D2=20^\circ\}$ ou $\{D1=20^\circ, D2=40^\circ\}$).

2nde Expérience EPR (cf. fichier « 05-Intrication Violation de Bell.xlsx ») :

Maintenant que tous les éléments sont en place, on peut vérifier les violations des inégalités de Bell de notre modèle qui ne sont que le post traitement des données précédentes. On rappelle que la valeur attendue par la MQ est $S_{MQ}(\theta) = E(a, b) + E(a, b') + E(a', b) - E(a', b') = 2\sqrt{2} \sim 2.83$ pour des valeurs de direction du détecteur 1, $a = 0^\circ$ ou $a' = 45^\circ$ et des valeurs de direction du détecteur 2, $b = 22.5^\circ$ ou $b' = 67.5^\circ$. Dans notre modèle, un évasement de 27.5° donne d'excellents résultats :

Evasement maximale source		27.5		
Paramètres	Detecteur 1	Coïncidences	Detecteur 2	Essais
a,b	4642	3839	4675	5500
a,b'	4644	3816	4634	5500
a',b	4646	3866	4689	5500
a',b'	4654	3853	4668	5500
Inégalité de Bell Mesurée		2.82621558		

Tab.7

Mais on peut violer les inégalités de manière plus forte encore :

Evasement maximale source		170		
Paramètres	Detecteur 1	Coïncidences	Detecteur 2	Essais
a,b	2553	1510	2621	5500
a,b'	2671	1565	2628	5500
a',b	2631	1528	2618	5500
a',b'	2620	1526	2637	5500
Inégalité de Bell Mesurée		3.43213582		

Tab.8

Ou de manière plus faible :

Evasement maximale source		5		
Paramètres	Detecteur 1	Coïncidences	Detecteur 2	Essais
a,b	5360	5225	5365	5500
a,b'	5360	5220	5360	5500
a',b	5357	5201	5344	5500
a',b'	5358	5174	5316	5500
Inégalité de Bell Mesurée		2.12704954		

Tab.9

Notre solution permet d'obtenir une plage de violation des inégalités de Bell (grossièrement dans l'intervalle $S_{MQ}(\theta) \in [2 ; 3.5]$ pour les directions précédentes a, a', b, b'). Sur la Fig.12, on présente quelques valeurs mesurées en fonction de l'évasement des couples de direction des objets sources. Ces mesures ont été réalisées avec les mêmes valeurs de direction du détecteur 1, $a = 0^\circ$ ou $a' = 45^\circ$ et de direction du détecteur 2, $b = 22.5^\circ$ ou $b' = 67.5^\circ$. Il est donc possible que pour ces directions, la violation ne soit pas maximale pour les évasements différents de 27.5° qui correspond à la maximisation dans le cadre des distributions de la MQ.

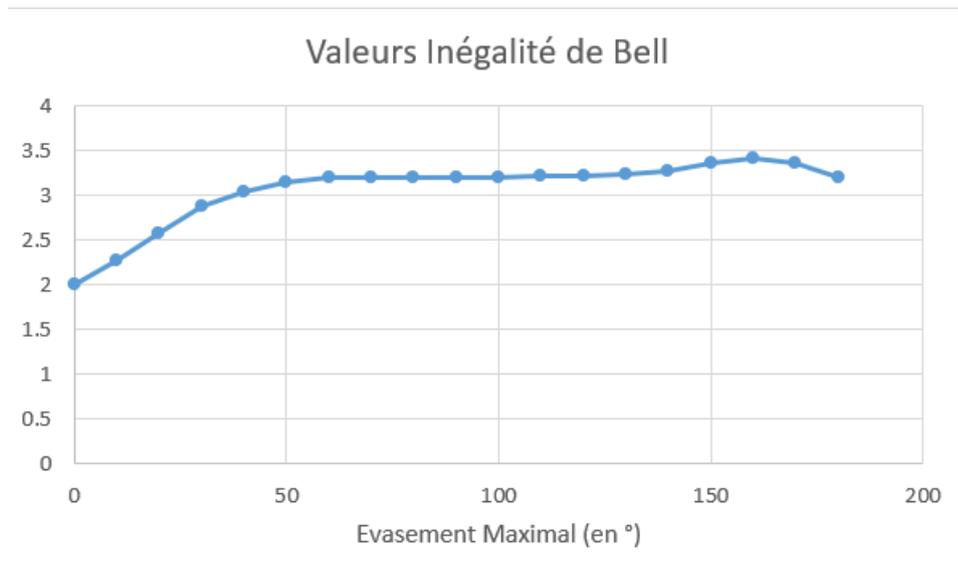


Fig.12

A noter, qu'on obtient aussi les mêmes résultats que ceux prévus par la MQ dans l'autre cas de maximisation de la violation des inégalités de Bell ($S_{MQ}(\theta) = -2\sqrt{2} \sim -2.83$), à savoir pour les valeurs de direction du détecteur 1, $a = 0^\circ$ ou $a' = 135^\circ$ et de direction du détecteur 2, $b = 67.5^\circ$ ou $b' = 202.5^\circ$.

A propos des non-détections :

Comme annoncé précédemment, montrons que les non-détections des expériences précédentes :

- Sont impossibles à éviter
- Ne peuvent correspondre non plus à une 3^{ème} valeur (qui compléterait les sorties possibles « +1 » et « -1 »)
- Sont d'un autre type que les échappatoires des expériences EPR réelles

Impossibilité d'éviter les non-détections :

Dans le cadre de notre expérience, on remarque que si les 2 directions nécessaires à la mesure sont légèrement supérieures à 90° , ces objets sources se trouveront très probablement dans l'ensemble des non-détections car chacune des 2 directions se retrouvera très probablement dans 2 secteurs de valeur différente. Un moyen à priori de réduire alors cet ensemble serait de diviser notre détecteur en plus de 4 secteurs ce qui permettrait pour certains de ces angles de se retrouver à nouveau dans 2 secteurs symétriques. Mais à l'opposé certaines directions qui précédemment se trouvaient dans 2 secteurs symétriques vont se retrouver dans le groupe des non détections. Il y a un en fait systématiquement un passage d'élément entre les groupes des non-détections et des détectés. Ceci découle du fait fondamental que nos mesures prennent en compte un couple de directions non colinéaires. Il s'agit donc d'un objet irréductible à une valeur (irréductible à 1 point !). On rappelle qu'on a vu précédemment que le cas limite d'évasement nul (donc de couples de directions colinéaires) donne le cas limite de non violation des inégalités de Bell, $S_{MQ}(\theta) = 2$. Notre mesure (par ces 2 directions) nous renseigne en fait sur 2 paramètres de l'objet en même temps, un intervalle de direction et un évasement de la croix. Si, sur le détecteur, on multiplie les secteurs, et donc qu'on réduit leur taille, une détection permettra d'obtenir une très bonne précision d'orientation et d'évasement de l'objet mesuré, mais en conséquence de nombreux objets sources

ne seront plus détectés. Et inversement, quelque soit le découpage en secteur, même pour les objets qui ont un évasement inférieur à l'angle du secteur, leurs directions aléatoires garantissent qu'il y aura toujours des objets dont une direction se trouvera d'un côté de la limite d'un secteur et l'autre direction de l'autre côté de la limite. Ceci est fondamentalement dû au fait d'avoir un objet « étendu » (irréductible).

L'ensemble des non-détections ne correspond pas à une 3^{ème} valeur de notre expérience :

On peut d'ailleurs aisément imaginer de telles expériences dans notre quotidien, par exemple les jeux d'enfants pour lesquels il faut faire passer des pièces d'une certaine forme dans des contre-formes. Imaginons avoir des cylindres tous de même longueur mais de largeurs différentes et une contre forme en forme de croix aux branches de longueur supérieure aux longueurs des cylindres (cette dimension ne sera donc pas filtrée) mais d'épaisseur égale à la moyenne des différentes épaisseurs des cylindres. Si l'on se donne la règle de maintenir l'orientation des cylindres (de ne pas les faire tourner), nous serons dans notre cas de figure. Certains cylindres passeront par la branche horizontale de la croix, d'autres par la branche verticale et certains ne passeront pas. Le passage dans la branche horizontale est une mesure donnant un intervalle d'épaisseur et d'orientation (les cylindres les plus fins pouvant avoir une certaine marge d'orientation pour passer dans l'épaisseur de la branche). Même chose pour la branche verticale mais avec un autre intervalle d'orientation (mais à priori le même intervalle d'épaisseur). Par contre, les non-détections vont correspondre soit à des cylindres qui n'ont ni l'épaisseur ni les orientations précédentes (ce qui pourraient faire l'objet alors d'une 3^{ème} valeur, ensemble disjoint des précédents) soit à des cylindres dans l'un des intervalles d'épaisseur ou d'orientation précédent mais en-dehors de l'autre intervalle. Ces deux derniers cas rendent la nature de l'ensemble des non-détections différente des 2 autres ensembles de détections. Si l'on peut dire, la « mesure des non-détections » ne nous fournit pas suffisamment d'information. L'ensemble des non-détections est constitué de 3 sous-ensembles qui ne sont pas distinguables, qui se superposent.

Les non-détections de la simulation ne sont pas les échappatoires des expériences EPR réelles :

Précédemment, on a parlé de la « mesure des non-détections » un peu abusivement (car justement ces objets sources ne fournissent pas de mesure), mais dans notre simulation nous les contrôlons totalement et nous savons pourquoi ils n'ont pas donnée de mesure. Alors que dans les expériences EPR, nous contrôlons beaucoup moins bien ce qui est émis. L'absence de détection peut être due en partie pour les raisons précédentes mais aussi évidemment par des pertes en ligne (que nous n'avons pas dans notre simulation qui a un taux d'efficacité de 100% puisque tous les objets sources passent dans les détecteurs et tous sont testés). Ces pertes en ligne vont évidemment potentiellement correspondre à la perte d'objets sources qui auraient pu être effectivement mesuré (n'appartenant pas à l'ensemble des non-détections). Ce sont ces détections perdues qui pourraient amener à modifier les statistiques, ce que l'on nomme les échappatoires. Les non-détections dont il s'agit dans notre simulation sont d'une autre nature car numériquement il n'y a aucune perte en ligne. Dans notre simulation, il n'y a pas d'échappatoire. Mais inversement, cette étude nous indique que, si notre solution est représentative des expériences de mécanique quantique, les non-détections des expériences réelles d'EPR ne sont pas exclusivement des pertes en ligne mais aussi des non-détections irréductibles. Ceci expliquerait en partie la difficulté à obtenir des efficacités élevées (en raison de l'existence d'un seuil supérieur d'efficacité possible).

Nos simulations ayant montré que les inégalités de Bell étaient systématiquement violées (sauf pour le cas limite où l'objet source n'est plus un objet étendu), la conclusion de cette longue réflexion est que notre modélisation rend nécessaire le triptyque « objet étendu de la source – ensemble

irréductible de non-détections – violation des inégalités de Bell ». Dans le cadre de simulations numériques, cet ensemble de non-détections n'est en rien une échappatoire. Dans le cadre des expériences réelles, l'ensemble des non-détections serait donc formé de 2 sous-ensembles, les échappatoires (pertes en ligne d'objets sources qui pourraient influencer sur les statistiques des résultats) et les non-détections irréductibles (nécessairement filtrer par les détecteurs). Cela implique une conséquence expérimentale sur les mesures d'efficacité. Le taux d'efficacité devrait ne mesurer que les pertes en ligne mais pas les non-détections (dans notre simulation, il n'y a pas de pertes en ligne, on a donc une efficacité de 100%). Expérimentalement, pour pouvoir distinguer le taux d'efficacité du taux de non-détections, on pourrait les calculer en faisant d'abord passer les objets sources dans un 1^{er} détecteur puis ne renvoyer que les objets ayant donné un certain résultat (par exemple « +1 ») sur un 2nd détecteur pour avoir un ensemble source connu. Avec une même direction de ce 2nd détecteur que le 1^{er}, le rapport du nombre de détection D2/D1 serait l'efficacité de D2 (dans notre simulation, ce rapport est effectivement de 100%). Elle ne devrait pas dépendre de l'orientation. Et pour une orientation de D2 différente de D1, le rapport D2/D1 mesurerait à la fois le taux d'efficacité (déduit de l'expérience précédente à même orientation) et le taux de non-détections (objets sources testés par le détecteur mais ne donnant pas de mesure), d'où l'on pourrait déduire le taux de non-détections. Ce taux de non-détections devrait dépendre de la différence d'orientation entre les 2 détecteurs. Il faut alors bien faire attention au vocabulaire utilisé, les échappatoires expérimentales ne correspondraient qu'à un taux d'efficacité, puisque le taux de non-détections, dans ce cadre théorique, serait inhérent à la théorie (aucune efficacité est en jeu dans cet ensemble) et irréductible.

Interprétation du couple de direction par une forme de sablier :

Nous avons précédemment pris l'exemple des jeux de forme pour enfant. En fait notre modélisation correspond potentiellement à un tel jeu. En effet, le couple de direction qui définit notre objet source n'est rien d'autre qu'une forme de sablier idéal (réduit à un point dans sa partie la plus resserrée). Les détecteurs peuvent alors être vu comme une grille idéale pour laquelle la croix perpendiculaire est formée de branche sans épaisseur. Pour des sabliers d'évasement inférieur à 90°, si le sablier source rencontre une branche de la grille (i.e. le couple de directions se trouve sur 2 secteurs de valeurs différentes) le sablier ne passe pas le détecteur, dans les autres cas il est détecté donnant « +1 » ou « -1 ». Dans cette interprétation « sous forme de solide », des sabliers avec un évasement compris entre 90° et 180° ne peuvent éviter de rencontrer la grille. Du coup, même si leurs bords (les 2 directions du couple objet source) se trouvent dans un secteur symétrique de même valeur, ils ne passeront pas le détecteur. Pour satisfaire cette interprétation, il suffit de considérer, dans notre modélisation, seulement les valeurs d'évasement comprises entre 0° et 90°. A noter que la limitation à l'intervalle [0°,90°] de notre modèle est suffisant pour la confronter à la MQ. En effet, on obtient la valeur de violation des inégalités de Bell calculée par la MQ dans cet intervalle. L'interprétation physique de sabliers sources pourrait donc aussi être pertinente pour interpréter la MQ dans le cadre des expériences EPR.

Ainsi notre objet étendu (objet source) peut se voir :

- Soit comme un couple de 2 directions (vide entre ces 2 directions),
- Soit comme un sablier (plein entre ces 2 bords)

Notre étude ne peut donner avantage à aucune des 2 interprétations.

Discussion :

Cette étude montre qu'une interprétation réaliste « classique » permet de retrouver les résultats d'expérience EPR. Mais rien ne dit que notre solution puisse fonctionner sur d'autres expériences de

MQ. Par contre, elle pourrait ouvrir la voie à une nouvelle classe de modélisation pour la MQ. Autrement dit, les ingrédients pour une interprétation de la MQ pourraient bien se trouver dans ce genre de modélisation. Il est donc important de reprendre les éléments clés de notre simulation. Il s'agit de la modélisation par des objets étendus (couple de paramètres) et son corollaire l'impossibilité de mesurer tous les objets sources dans une même expérience (ensemble irréductible d'objets non-détectés). Une autre conséquence apparaît, mais spécifiquement pour ces expériences EPR, la violation systématique des inégalités de Bell. Ces éléments fondamentaux font étonnamment échos à plusieurs caractéristiques de la MQ :

Thème de la non-localité (objet étendu) :

Un des intérêts majeurs des expériences EPR est de mettre à mal la notion de localité de la réalité physique. Dans une interprétation « classique » (plus exactement que je qualifierai de « linéaire », j'en parle un peu plus loin), cela s'interprète comme une transmission d'information instantanée ou du moins supérieure à la vitesse de la lumière. Dans notre simulation, il n'y a aucune information qui circule entre les détecteurs. La simulation numérique que nous venons de réaliser permet du coup de redonner une interprétation nouvelle à la non-localité. Il s'agit d'une « non-localité locale » due à la modélisation d'objets étendus (irréductible à un point). Car comme on a pu le constater, dans le cas limite d'un évasement nul (réduction à une direction), la valeur de l'inégalité de Bell tend vers 2. Mais dès que l'évasement des sabliers est non nul, la violation des inégalités est systématique. Dans cet ordre d'idée, on peut se demander si la MQ n'est pas une approche linéaire d'une réalité qui nécessiterait une théorie non-linéaire.

Thème de la mesure en MQ (objet étendu) :

Il y a une autre conséquence de la modélisation par des objets étendus qui pourrait expliquer l'impression quantique de modification de l'objet mesuré après une mesure. Comme l'objet a une extension spatiale, lorsqu'il passe par un détecteur, on peut seulement en conclure qu'il existe une certaine distribution de « sabliers » plus ou moins évasés qui sont susceptibles d'être passés. En conséquence, on sait que si le sablier repasse par un autre détecteur de même orientation, il sera détecté de manière certaine (donnant l'impression d'avoir modifié l'objet mesuré), mais dès que l'on changera l'orientation du détecteur (aussi petit que soit ce changement) on ne peut plus garantir que le « sablier » pourra passer dans le même secteur (en rendant le résultat de nouveau probabiliste). Car il s'agit peut-être d'un sablier très évasé qui était en limite d'être non-détecté ou bien très fin et en limite de changer de secteur et donner une autre valeur. Mais dans notre simulation, à aucun moment l'objet mesuré est modifié.

Comme on l'a vu dans cet article, l'objet étendu (le sablier) se définit par 2 paramètres. Les mesures sur cet objet étendu permettent seulement de limiter les intervalles possibles des 2 caractéristiques définissant l'objet étendu (une orientation et un évasement). On pourra réduire énormément les intervalles, mais ils ne seront jamais réduits à un point. Ce processus ressemble un peu au principe d'Heisenberg. Ce n'est peut-être pas tout à fait la même chose mais cette irréductibilité est certainement un ingrédient nécessaire qui conduit à ce principe.

Thème de la complémentarité et de la dualité (ensemble de non-détections) :

Un point important est que la simulation numérique permet d'étudier l'ensemble des non-détections (impossible en conditions réelles). On peut le faire de 2 manières différentes. La 1^{ère} consiste à tourner les détecteurs d'un autre angle que celui de l'expérience en cours, mais, comme on l'a déjà vu, cela ne fait que passer une partie des non-détections dans l'ensemble des détectés et inversement (transfert partiel des ensembles des détectés et des non-détections). Cela révèle finalement une

invariance des résultats par rotation. La seconde consiste à refaire la même expérience mais en remplaçant le détecteur par un détecteur « dual », toujours défini par 4 secteurs, mais dont les valeurs « +1 » et « -1 » sont portées par les 2 axes de séparation des secteurs et la règle de détection par la règle complémentaire :

Si les 2 bords du sablier se situent dans deux secteurs de valeurs différentes, le détecteur fournit en sortie la valeur de l'axe de séparation des secteurs qui intersecte le sablier.

Cette expérience duale/complémentaire (de l'expérience précédente) ne détectera que l'ensemble précédemment qualifié de non-détecté, mais cette fois dans sa totalité, et l'autre ensemble deviendra l'ensemble des non-détectés, aussi dans sa totalité (transfert total des ensembles des détectés et des non-détectés). Et nous obtiendrons les mêmes statistiques. Cette caractéristique rappelle la transformation d'une matrice en une matrice adjointe. Ainsi ces ensembles de non-détectés pourraient justifier l'usage de probabilité dans un espace de nombre complexe, espace privilégiée de la MQ avec sa notion de dualité.

En somme, on a 2 formes de complémentarité à 2 échelles différentes. Au sein de l'ensemble des détectés, les probabilités des 2 états notés $|\uparrow\uparrow\rangle$ ou $|\rightarrow\rightarrow\rangle$ se complètent (« $\cos^2 + \sin^2 = 1$ »). Mais aussi, les 2 ensembles de détectés et de non-détectés se complètent pour former des expériences duales/complémentaires.

L'existence de cet ensemble de non-détectés pourrait être un signe caractéristique des expériences de MQ, lorsque les réponses possibles à une mesure ne sont plus simplement binaires mais "ternaires" avec comme 3^{ème} réponse possible l'indétermination/la non mesurabilité. Les guillemets signifient que c'est un 3^{ème} élément de nature différente des 2 autres valeurs. Cela rappelle ce qui se passe en logique mathématique pour les valeurs de vérité d'une formule qui peut être vraie ou fausse. Il existe une 3^{ème} voie, une « échappatoire » Gödelienne, par laquelle une formule peut être indécidable. Et cette 3^{ème} voie n'est pas une échappatoire, un biais de raisonnement, mais un fondement de la logique.

Objet étendu et non-linéarité :

Une théorie qui se base sur des objets non réductibles à un point est très certainement une théorie non linéaire (cf. article « Study about Non-Linear Structures » [10.4236/oalib.1106726](https://arxiv.org/abs/10.4236/oalib.1106726)). L'adéquation de notre solution avec les résultats d'expérience EPR, nous laisse penser que la MQ serait en quelque sorte une approximation linéaire d'une théorie non linéaire plus profonde, sous-jacente. Ce point de vue serait cohérent avec certaines caractéristiques de la MQ partagées avec le non-linéaire. Par exemple, l'intrication avec ses effets corrélés quelque soit la taille du système est une forme d'invariance d'échelle, caractéristique que l'on retrouve dans le domaine du non-linéaire. La difficulté à atteindre des taux d'efficacité élevée dans les expériences de MQ est peut-être révélateur d'une non-binarité de la réalité quantique, là encore un élément central du domaine non-linéaire. Mais on peut même imaginer une autre conséquence mathématique intéressante. Notre étude suggère qu'on peut obtenir de nombreuses autres valeurs des inégalités de Bell. Comme on peut s'y attendre et comme cela est démontré dans les courbes Fig.8,9,10,12 cela se traduit par une courbe de $E(a, b)$ différente de celle de la MQ. On peut certainement imaginer une théorie à la manière de la MQ mais avec d'autres formes de distribution de probabilité (autre que cos/sin).

Conclusion :

Le but de cet article n'est pas de prendre le modèle qui y est étudié comme l'interprétation de la MQ mais de mettre en avant les éléments clefs qui pourraient permettre d'interpréter et comprendre la MQ en développant d'autres modèles de même nature. Ainsi la modélisation effectuée dans cet article n'est certainement qu'une représentation d'une classe très large de nouvelles modélisations susceptibles de mieux expliquer différentes expériences de MQ. Les principes de base qui ressortent de cette classe de modèle se résument essentiellement dans le triptyque « objet étendu (irréductible à un point) / ensemble irréductible de non-détection / violation des inégalités de Bell ». Ces éléments seront très certainement rattachés au domaine du non-linéaire.

Rappelons qu'on vient de mettre au point une modélisation qui viole systématiquement les inégalités de Bell, qui rend nécessaire les non-détections (qui sont d'une nature différente des échappatoires expérimentaux). Dans ce cadre, aucune transmission supra-lumineuse n'est requise et la non-localité se traduit par une modélisation par objets étendus (forme locale d'une non-localité de la physique quantique et par là même de la réalité aux très petites échelles). Cette modélisation implique aussi qu'expérimentalement les non-détections sont composées à la fois de pertes de signal (qu'il faut réduire au maximum) mais aussi d'un ensemble irréductible. Cela expliquerait la difficulté que l'on a à augmenter le seuil d'efficacité des expériences EPR.

Cette étude espère avoir ouvert de nouvelles voies pour interpréter la mécanique quantique de manière plus conventionnelle. Et de nombreuses questions restent ouvertes...

On peut s'interroger si l'existence de non détections irréductibles dans les mesures ne justifie pas une approche nécessairement probabiliste de la théorie. La complémentarité et la dualité des ensembles de non-détections et détections pourraient apporter un nouvel éclairage sur le rôle des nombres complexes dans la fonction d'onde. La modélisation par objets étendus pourrait engendrer les incertitudes sur les mesures de données conjuguées (par exemple l'impossibilité de définir une trajectoire aussi précisément que voulu), et peut-être aussi permettre la superposition des états.