

Le problème de la localité en mécanique quantique

Soazig Le Bihan

1. Introduction : Corrélations quantiques et théorèmes de type Bell

Imaginez que l'un de vos collègues, Alain, est d'une humeur absolument exécrationnelle certains jours, ces jours semblant survenir de façon parfaitement aléatoire. Imaginez ensuite que votre partenaire a pour collègue Bernard, qui se trouve lui aussi avoir ses mauvais jours, ici encore distribués de façon parfaitement irrégulière. Supposez enfin que, bien que Alain et Bernard ne se soit jamais rencontrés, vous remarquez que leurs mauvais jours tombent systématiquement en même temps. Face à de telles corrélations, il est bien naturel d'abord de s'étonner, puis de chercher une explication.

Sans aucun doute serez-vous alors satisfait de découvrir que Alain et Bernard vont chercher, et ce de façon indépendante, leur croissant du matin à la même boulangerie, et que les jours de mauvaise humeur correspondent aux jours où les croissants sont trop cuits. Les corrélations observées entre les états d'humeur de Alain et de Bernard ne sont dès lors plus un mystère. Bien au contraire, vous avez maintenant la possibilité de construire ce qu'on peut appeler un *modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune* : *local* d'abord parce que le modèle n'implique aucune influence à distance d'un état d'humeur sur l'autre entre votre lieu de travail et celui de votre partenaire ; *déterminé* ensuite parce que l'état de l'humeur de vos sujets d'expérience n'est en réalité pas vraiment aléatoire, mais est bien fixé avant que vous ne l'observiez – de fait, depuis l'achat des croissants : le caractère apparemment aléatoire des phénomènes observés n'est que le reflet du fait que les observateurs en ignorent la structure causale sous-jacente ; *en termes de cause commune* enfin, parce que cette structure causale sous-jacente permet de remonter à la cause commune des états d'humeur similaires. Pour résumer, le fait que des corrélations sont observées entre des événements apparemment

indépendants et séparés dans l'espace est compris en termes d'une cause commune à partir de laquelle se déploient ces deux chaînes causales corrélées mais parfaitement continues dans l'espace et le temps que sont les vies indépendantes de Alain et Bernard, après leur passage à la boulangerie et qui déterminent pleinement le résultat de vos observations, à vous et votre partenaire, quand vous arrivez au bureau. Le *modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune* est l'un de nos modèles d'explication préférés pour des corrélations du type de celle décrites ici entre Alain et Bernard.

Considérez maintenant le dispositif expérimental suivant (Figure 1). Un système quantique est conçu au niveau d'une source de telle façon que deux sous-systèmes (ou du moins ce qui est communément compris comme deux sous-systèmes, nous y reviendrons plus loin), quittent la source dans des directions opposées, et se dirigent vers deux appareils de mesure qui peuvent être réglés de sorte à mesurer certaines des propriétés observables de ces sous-systèmes. On compare alors les résultats de mesure obtenus de chaque côté de l'expérience. Certains systèmes quantiques se comportent comme Alain et Bernard, c'est-à-dire que, alors que de chaque côté de l'expérience, les résultats semblent parfaitement aléatoires, il se trouve que, si on compare les résultats obtenus, les résultats observés sont corrélés. Imaginons par exemple (et pour éviter toute technicité inutile à ce niveau) que l'on mesure l'« humeur » des sous-systèmes, et que seuls deux états soient possibles : bonne ou mauvaise.¹ Alors il existe des systèmes quantiques tels que, tandis que la mesure de l'humeur de chaque sous-système donne pour résultat soit « bonne » soit « mauvaise » de façon apparemment parfaitement aléatoire, les résultats sont parfaitement corrélés quand on les compare : les deux sous-systèmes sont systématiquement tous deux soit « de bonne humeur » soit « de mauvaise humeur ».

¹ Pour ceux intéressés par des détails plus techniques, on considère généralement une expérience dans laquelle on mesure le spin des systèmes le long de différents axes.

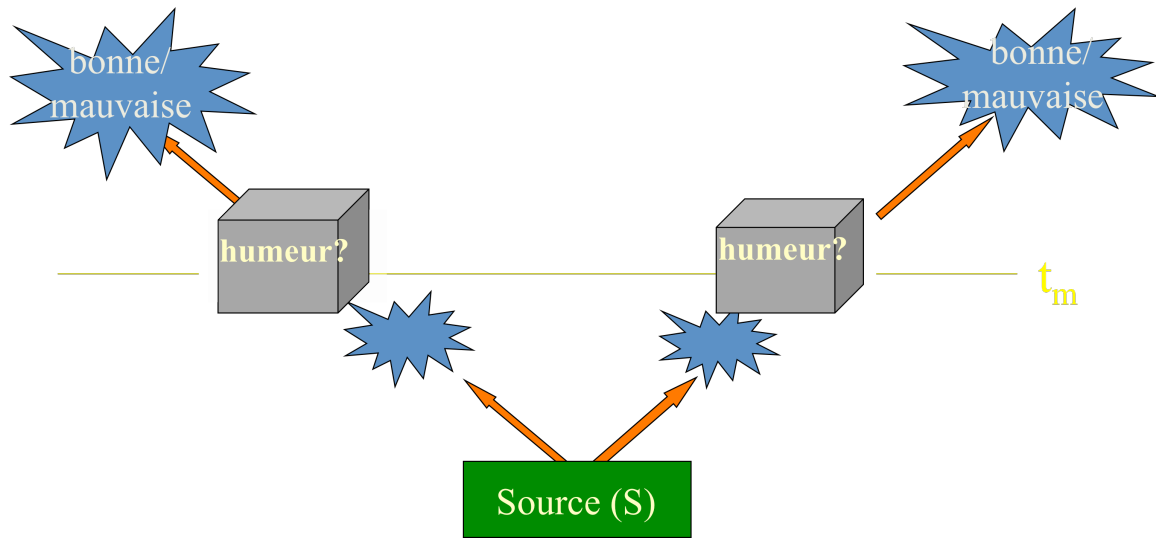


Figure 1 : Une situation expérimentale de type Bell.

Jusqu'ici, il n'y a aucune raison de crier au scandale: le monde est plein de corrélations, et la science est riche de modèles d'explications, du type de ce que nous avons décrite ci-dessus. On peut facilement imaginer que l'état d'humeur des sous-systèmes soit déterminé à la source, avant que les deux sous-systèmes ne se déploient pour suivre des routes indépendantes parfaitement continues dans l'espace-temps, leurs états d'humeurs restant corrélés (Figure 2).

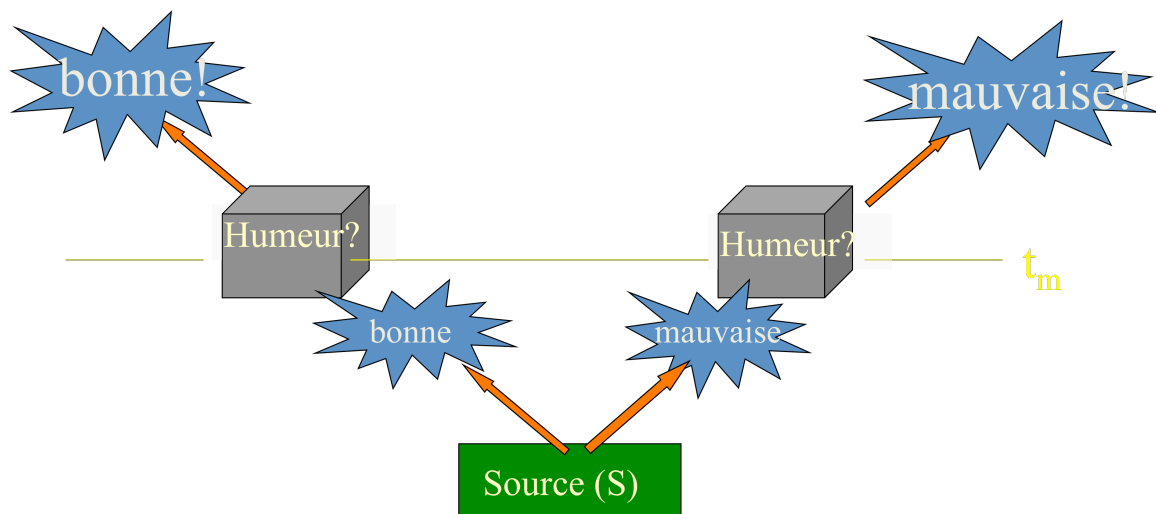


Figure 2 : le modèle local déterminé en termes de cause commune pour des corrélations.

La question est de savoir si toutes les corrélations quantiques peuvent être expliquées de cette façon. C'est cette question à laquelle s'est attaché John Bell dans les années soixante. Il tenta de formuler de façon formelle la possibilité pour des corrélations entre des résultats d'expérience de se voir donner un modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune. Il parvint à montrer que, si un tel modèle d'explication est possible, alors les distributions de probabilités de ces résultats d'expérience doivent satisfaire certaines inégalités – les fameuses Inégalités de Bell. Ceci est équivalent à dire que des résultats d'expérience distribués de telle sorte que ces inégalités ne sont pas respectées ne peuvent en aucune façon se voir donner un modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune. C'est là le contenu du fameux Théorème de Bell.²

Bell montra de plus que la mécanique quantique prédit que certains systèmes quantiques présentent des corrélations qui précisément violent ces fameuses inégalités. A ce stade, la conclusion que l'on doit tirer est la suivante : ou bien ces prédictions sont infirmées par l'expérience, et la théorie est falsifiée, ou bien ces corrélations sont bien observées telles que prédites par la théorie, et alors, nous nous trouvons devant un cas de corrélations pour lesquelles un modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune est impossible. De nombreuses expériences furent conduites, et c'est avec les travaux d'Alain Aspect et de ses collaborateurs³ que la communauté des physiciens fut convaincue que les

² Il existe une littérature massive concernant le théorème de Bell. On consultera en priorité les articles originaux de Bell, dont les plus importants sont réunis dans Bell (1987). Cushing (1989) est un bon exemple des discussions philosophiques à ce sujet. Enfin, pour une synthèse récente, voir Shimony (2009). Notons enfin que nous ne nous occuperons pas dans cet article du contexte historique des travaux de Bell, et en particulier de leur lien avec l'argument de Einstein, Podolski et Rosen (1935) selon qui la mécanique quantique ne saurait être considérée comme complète.

³ Voir Aspect et al. (1982), Aspect (1983) et, pour une présentation grand public Aspect (2002). Redhead (1987, p. 108) offre un tableau des différentes expériences faites jusqu'au milieu des années quatre-vingt. De nombreuses autres expériences sont été conduites depuis, parmi lesquelles les plus connues sont celles des équipes de Zeilinger à Vienne, et de Gisin à Genève (voir par exemple Zeilinger 1999 pour une présentation non technique).

prédictions de la mécanique quantique étaient bien correctes.⁴ Il existe bien des systèmes quantiques qui, soumis à certaines mesures, présentent des corrélations qui violent les inégalités de Bell. Par un simple *modus tollens*, on peut donc conclure qu'il existe des phénomènes physiques qui ne peuvent pas se voir donner un modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune du type de celui que nous avons donné aux corrélations entre les humeurs de Alain et Bernard.⁵

Il reste à savoir comment interpréter ces résultats d'expérience, et c'est là que l'analyse philosophique peut jouer, et, de fait, a joué, au cours des 30 dernières années, un rôle crucial. Certains ont affirmé que nous avons là un cas de « métaphysique expérimentale »,⁶ en ce sens que l'expérience nous permettrait de tirer des conclusions concernant la structure ontologique fondamentale de l'univers : soit qu'il est constitué de systèmes dont les propriétés fondamentales sont indéterminées, soit qu'il est fondamentalement non-local, etc. Concernant la non-localité, beaucoup ont pris peur de voir surgir un conflit radical entre le comportement des systèmes quantiques et les principes de la théorie de la relativité. La liste est longue de toutes les façons dont les résultats des expériences de type

⁴ La grande majorité des physiciens considèrent ces résultats d'expérience comme conclusifs. Certaines présuppositions des expériences sont cependant toujours considérées comme problématiques par certains. C'est le cas en particulier de l'hypothèse qui est généralement faite sur le caractère représentatif de l'échantillon des systèmes qui sont de fait détectés par le dispositif de mesure. Certains des systèmes mis à l'entrée du dispositif ne sont en effet ni détectés ni mesurés en sortie. Pour plus de détails (et des références) sur le problème de l'efficacité de la détection, voir Shimony 2009, Section 4.

⁵ Pour obtenir ces corrélations, il faut mettre en place un dispositif qui puisse mesurer deux observables. Disons, dans notre cas, que l'on mesure non seulement l'humeur – qui peut être soit bonne soit mauvaise – mais aussi l'appétit – qui peut être soit grand soit petit. Certains systèmes quantiques peuvent présenter (a) des corrélations parfaites quand le dispositif est tel que l'on mesure le premier observable – l'humeur – au moins sur l'un des côtés de l'expérience, *et* (b) des anti-corrélations parfaites quand le dispositif est tel que le second observable – l'appétit – est mesuré de chaque côté. De telles corrélations ne peuvent être reproduites au sein d'un modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune.

⁶ La formule est de Shimony (1981, p.572), et est reprise, entre autres, par Jarrett (1989, p. 60-63).

Bell ont pu être interprétés, signe qu'une analyse précise de la situation est de rigueur. C'est ce que nous nous proposons d'offrir ici.

Plus précisément, nous nous concentrerons sur l'interprétation sur laquelle la communauté des philosophes et physiciens semble au moins à première vue s'être mise d'accord, interprétation que nous appellerons *l'interprétation commune*, et qui est présentée en Section 2. Nous montrerons cependant que la justification habituelle donnée à cette interprétation n'est pas satisfaisante. Nous nous proposons donc de l'évaluer à nouveaux frais à la lumière d'une analyse philosophique rigoureuse.

De notre analyse s'en suivent les résultats suivants: premièrement, en accord avec l'interprétation commune, il n'y a pas nécessairement conflit entre les phénomènes quantiques et les principes de la théorie de la relativité ; deuxièmement, cette fois contrairement à ce qu'ont pu avancer au moins certains des défenseurs de l'interprétation commune, on ne saurait déduire quoique ce soit de la structure ontologique fondamentale sur la seule base des résultats d'expérience – des conclusions métaphysiques ne s'en suivent que si l'on précise certains éléments d'interprétation; en revanche, et c'est le dernier point, les thèses constitutives de l'interprétation commune peuvent se voir justifier au niveau phénoménal ou empirique. Mais commençons par décrire l'interprétation commune et les difficultés qu'elle rencontre.

2. Corrélations de Bell : l'interprétation commune et ses problèmes

2.1 L'interprétation commune

Qu'est-ce que cela peut vouloir dire que certaines corrélations ne peuvent se voir donner de modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune ? Pour répondre à cette question, il nous faut regarder le Théorème de Bell, et les analyses qui en ont été faites, de façon plus précise.

Notons d'abord qu'il existe plusieurs « théorèmes de Bell », parmi lesquels certains se placent dans un cadre déterministe, d'autres dans un cadre stochastique. Dans le

premier cas, si on reprend notre exemple de Alain et Bernard, un niveau donné de cuisson des croissants ne peut avoir pour effet qu'une seule qualité d'humeur chez Alain et Bernard. Dans le cas stochastique en revanche, un niveau donné de cuisson des croissants peut donner lieu à différentes humeurs chez Alain et Bernard. Notons que la différence ne se situe pas au niveau des résultats observés – la qualité de l'humeur de Alain et Bernard sont corrélées de la même façon dans les deux cas – mais au niveau du processus (soit déterministe, soit stochastique) qui lie les causes profondes (souvent appelées variables cachées) aux résultats observés. Il existe une version du théorème de Bell pour chacun des cas. Du fait de sa plus grande généralité, nous nous concentrerons sur le cas stochastique.

Dans le cas déterministe comme dans le cas stochastique, le théorème de Bell porte sur les corrélations, soit encore sur les distributions de probabilité sur les résultats d'expérience.⁷ Dans le cas stochastique, le théorème montre que si les distributions de probabilité sur les résultats d'expérience satisfont une certaine condition, appelée *condition de factorisation* ou *factorisabilité*, alors elles satisfont aussi certaines inégalités. Bell conçut cette condition comme une formulation formelle de la notion de *localité* pour les modèles dits « à variables cachées », qui ne sont autres que des modèles de type *déterminé* déjà évoqués plus haut, c'est-à-dire dans lesquels le caractère apparemment aléatoire des résultats d'expérience est en réalité le reflet de notre ignorance des propriétés déterminées des systèmes (ce sont là les variables cachées), et ce indépendamment du fait qu'on les mesure ou non.⁸

⁷ C'est-à-dire sur la façon dont les probabilités sont distribuées sur les résultats possibles. Donnons un exemple de distribution de probabilité des plus simples: d'une urne contenant 100 boules, dont 30 bleues, 45 blanches, et 25 rouges, on a 30% de chances de tirer une boule bleue, 45% de tirer une blanche et 25% de tirer une rouge.

⁸ Pour la petite histoire, Bell s'intéressait alors aux théories de type de Broglie - Bohm du fait que ces théories, à la différence de la mécanique quantique orthodoxe, permettent de conserver une vision déterminée et déterministe de l'univers physique. Bell nota cependant que ces théories étaient caractérisées par une forme de non-localité. Son but était de voir si toute théorie quantique de ce type – déterminée et/ou déterministe – devait nécessairement être non-locale. On peut

Pour le dire autrement, tout processus physique à propriétés déterminées produisant des résultats d'expérience distribués de telle sorte que la condition de factorisation est satisfaite serait local, et tout processus physique produisant des résultats distribués de telle sorte que la condition n'est pas satisfaite serait non-local. Un événement donné est considéré ici comme local au sens de l'indépendance statistique vis-à-vis d'événement éloignés. L'idée est que, pour reprendre notre exemple initial, à degré de cuisson fixe des croissants (λ) – ce sont là les variables cachées qui déterminent les résultats même si on ignore de quelle façon, le résultat (A) de la mesure (i) de l'humeur de Alain ayant lieu dans votre lieu de travail est statistiquement indépendant du résultat (B) de la mesure (j) de l'humeur de Bernard prenant place au lieu de travail de votre partenaire:

$$(FAC) \quad p(A,B|\lambda,i,j) = p(A|\lambda,i) p(B|\lambda,j)$$

La question est de savoir dans quelle mesure cette notion d'indépendance statistique est liée à celle de localité. Cette question est cruciale dans la mesure où on pourrait s'inquiéter d'un possible conflit avec la Relativité.⁹ Pourtant, cela n'a rien d'évident. On peut le voir de façon très simple : la notion de localité est une notion éminemment spatiale ou spatio-temporelle. Or FAC ne comprend aucune variable ni d'espace ni de temps. L'idée FAC est une condition de localité, la question du conflit avec la Relativité, et, plus généralement, la façon propre d'interpréter la condition de factorisation, ont été au cœur des débats concernant l'interprétation des théorèmes et expériences de type Bell depuis trente ans.

Jarrett et Shimony ont offert une analyse mathématique et conceptuelle qui semble pouvoir faire avancer grandement le débat.¹⁰ Ils montrèrent en effet (chacun de façon indépendante) que la condition de factorisation est équivalente à la

comprendre son théorème comme répondant positivement à cette dernière question.

⁹ Ceci dépend de l'interprétation que l'on fait de la théorie de la Relativité. Nous n'entrerons dans aucun détail concernant cette question. Pour une étude détaillée des relations entre Théorèmes de Bell et Relativité, voir Maudlin(1994).

¹⁰ Certains, comme Maudlin, nient que ce soit le cas.

conjonction de deux conditions distinctes : l'indépendance vis-à-vis des paramètres et l'indépendance vis-à-vis des résultats.¹¹ La condition d'indépendance vis-à-vis des résultats (IR) requiert que le résultat de mesure sur l'un des sous-systèmes soit indépendant du résultat de mesure sur l'autre sous-système :

$$(IR) \quad p(A,B|\lambda,i,j) = p(A|\lambda,i,j) p(B|\lambda,j,i)$$

IR est une simple condition d'indépendance statistique entre les résultats, quand tous les autres paramètres sont fixés. Pour obtenir la condition de factorisation à partir de IR, il faut introduire une condition qui « sépare » les mesures i et j l'une de l'autre dans le produit des probabilités. C'est ce que fait la condition IP, en demandant que le résultat de mesure sur chaque sous-système soit indépendant d'un changement du type de mesure effectuée sur l'autre sous-système :

$$(IP) \quad p(A|\lambda,i,j) = p(A|\lambda,i,j') \text{ et } p(B|\lambda,i,j) = p(B|\lambda,i',j)$$

L'intérêt que peut présenter l'analyse de la condition de factorisation comme la conjonction de IR et de IP n'est pas d'ordre expérimental, mais proprement philosophique. En effet, la conséquence immédiate de cette analyse est que le résultat du modus tollens caractéristique des théorèmes de Bell prend une nouvelle forme. La conclusion précédente, qui était que toute théorie rendant compte de toutes les corrélations quantiques doit violer la condition de factorisation, devient désormais la suivante : toute théorie rendant compte de toutes les corrélations quantiques doit violer soit IR soit IP (soit les deux). Cela veut dire que nous n'avons besoin d'abandonner qu'une partie de la condition de factorisation.

¹¹ La distinction entre "*outcome independence*" et "*parameter independence*" fut faite pour la première fois par Suppes et Zanotti (1976), et utilisée par van Fraassen pour son analyse de la situation dans son (1989). Ceci dit, Jarrett et Shimony furent les premiers à lier la distinction au débat concernant les relations entre théorème de Bell et Relativité. Pour plus de détails, voir Jarrett (1984, 1989) et Shimony (1984, 1989). Les formules "*outcome independence*" et "*parameter independence*" sont de Shimony. Jarrett les nomment "*completeness*" et "*locality*" (ou plus exactement nomment ainsi ses propres conditions, qui sont très proches des conditions de Shimony, mais pas tout à fait identiques – voir Le Bihan 2008, chap. 4).

Jarrett et Shimony affirmèrent de plus que la distinction entre IR et IP est pertinente quant à la question de savoir si la violation des inégalités de Bell par les phénomènes quantiques entre en conflit avec la Relativité. Selon eux, toute théorie violant IP serait en conflit avec la Relativité, alors que ce ne serait nécessairement pas le cas pour les théories ne violant que IR. Des théories violant IR pourrait rester en état de « coexistence pacifique », selon la formule de Shimony (1978), avec la théorie d'Einstein. Leur argument consiste essentiellement à dire que, tandis qu'une violation de IP permettrait, en principe, d'envoyer des signaux plus vite que la lumière, ce ne serait pas le cas pour une violation de IR.

Plus précisément, leur argument est le suivant.¹² Si nous pouvions contrôler les variables cachées (autrement dit, si nous étions capables de préparer un ensemble de systèmes dans un même état – variables cachées incluses – et de maintenir ces systèmes dans ce même état), alors nous pourrions communiquer d'un côté à l'autre de l'expérience grâce à une violation de IP. Concrètement, considérons un expérimentateur situé à l'un des côtés de l'expérience, disons à gauche, capable de préparer un tel ensemble de systèmes. Alors un expérimentateur à droite pourrait changer les résultats obtenus à gauche, en changeant le type de mesure effectuée de son côté (à droite). Ceci aurait pour résultat de changer les statistiques observées par l'observateur à gauche, et donc constituerait un signal. Au moyen d'un grand nombre de systèmes de type Bell, et d'un dispositif tel que les deux expérimentateurs se trouvent très éloignés l'un de l'autre, il semble que l'on pourrait envoyer des signaux à une vitesse arbitrairement élevée. Si, en revanche, comme dans le cas où seule IR est violée, les résultats observés sont indépendants des paramètres de la mesure, aucun signal supraluminal ne peut être transmis entre les observateurs, même si les résultats sont corrélés.

Jarrett et Shimony, et à leur suite la grande majorité des physiciens et philosophes, concluent de l'argument ci-dessus qu'une violation de IP offrirait les moyens

¹² Cet argument est formulé pour la première fois dans Jarrett (1984) et Shimony (1984). Il est raffiné dans Jarrett (1989). Nous présentons ici une synthèse des arguments de Shimony et de Jarrett.

d'envoyer des signaux supraluminaux, et donc que, dans la mesure où l'envoi de signaux est un cas de processus causal, une violation de IP est le signe de l'existence d'un processus causal potentiellement non-local entre les paramètres des appareils de mesure d'un côté de l'expérience et les résultats de la mesure de l'autre. En revanche, disent-ils, une violation de IR ne saurait être comprise comme le signe de l'existence d'un processus causal non-local entre les résultats de mesure, mais doit plutôt être interprétée comme le signe de l'existence d'une forme de holisme, ou, autrement dit, comme indiquant que les systèmes que nous considérons comme séparés – deux sous-systèmes – ne font en réalité qu'un, et ceci malgré leur apparente séparation dans l'espace.¹³ Arguant enfin que la théorie de la Relativité interdit tout processus causal non-local, il est conclu que toute violation de IP implique un conflit ouvert entre physique quantique et Relativité. Il nous faut donc, nous dit-on, nous résoudre à accepter que IR soit la condition violée par les phénomènes de type Bell, et que, dans ce cas, si une forme de coexistence pacifique est sauvée entre physique quantique et Relativité, il n'en reste pas moins que l'existence des corrélations de type Bell nous force à admettre l'existence d'une forme de lien non-causal entre les systèmes, qu'il est possible de comprendre en termes de holisme.

Encore une fois, nous ne nous préoccupons pas ici des questions d'interprétation de la théorie de la Relativité, et si oui ou non elle interdit soit l'envoi de signaux, soit l'existence de processus causaux supraluminaux, ou quoique ce soit d'autre encore. Nous nous concentrerons plutôt sur la première partie de l'argument ci-dessus, à savoir sur la question de l'interprétation de IP et IR, selon laquelle toute violation de IP seule implique l'existence d'un processus causal potentiellement non-local tandis que la violation de IR seule peut (et peut être doit) être interprétée en termes de

¹³ Pour se donner une idée des différentes interprétations des violation de IP et IR, on consultera par exemple Cushing et McMullin (1989). En ce qui concerne les interprétations en terme de holisme, on consultera d'abord l'article séminal de Howard (1985). Parmi les plus récentes contributions au débat, on trouve Winsberg et Fine (2003), et la réponse que leur donne Fogel (2007). Healey (2009) offre une synthèse récente des débats autour de la question.

holisme. Remarquons que nous avons ici une thèse qui comporte en réalité trois composantes distinctes :

(CAUS) IP est une condition de causalité, i.e. une violation de IP seule est le signe de l'existence d'un lien causal entre les paramètres des appareils de mesure d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre, tandis que IR n'en est pas une, i.e. une violation de IR seule n'est pas le signe de l'existence d'un lien causal entre les résultats de chaque côté de l'expérience;

(LOC) IP est une condition de localité, i.e. une violation de IP seule est le signe de l'existence d'un processus non-local entre les paramètres des appareils de mesure d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre, tandis que IR n'en est pas une, i.e. une violation de IR seule n'est pas le signe de l'existence d'un processus non-local entre les résultats de chaque côté de l'expérience;

(HOL) une violation de IR indique l'existence d'une forme de holisme.

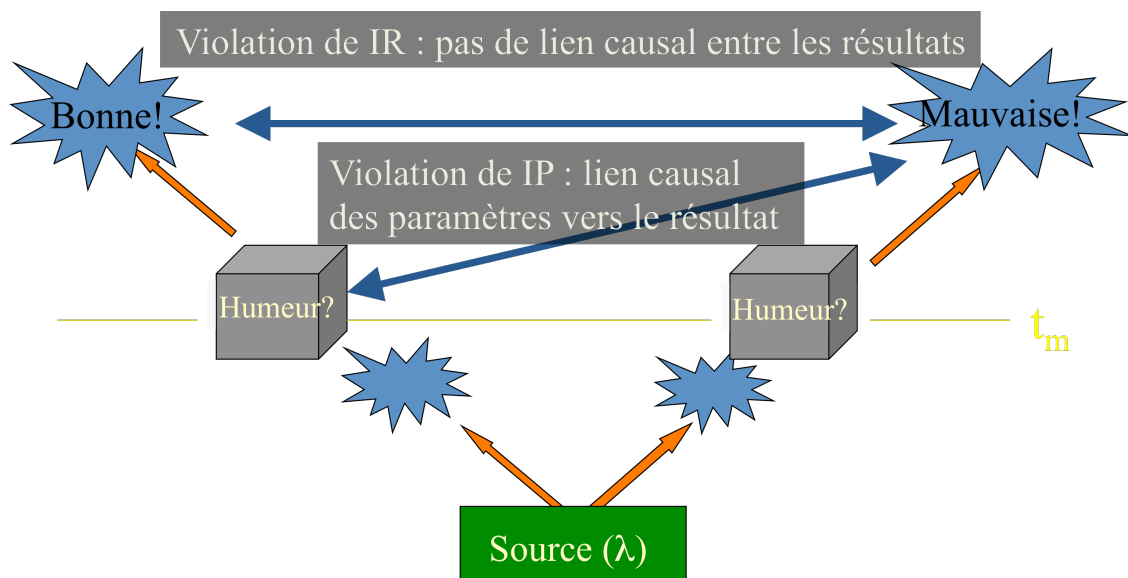


Figure 3 : l'interprétation commune des situations de type Bell.

C'est là le contenu de *l'interprétation commune* (Figure 3), que nous voulons évaluer de façon rigoureuse ici, tout simplement parce que l'argument offert par Jarrett et

Shimony n'est pas suffisant pour établir leur thèse, comme nous allons le montrer maintenant.

2.2. Les fondements de l'interprétation commune mis à mal

Comme nous l'avons dit plus haut, la majorité des philosophes s'est rangée aux côtés de Jarrett et de Shimony et a accepté l'interprétation commune. Cedi dit, un certain nombre d'auteurs se sont montrés plus critiques à l'égard de cette thèse. Par exemple, Earman (1986) conteste que la condition de factorisation soit une condition de localité, Butterfield (1992) soutient que l'interdiction de signal supraluminal n'implique pas qu'une violation de IR soit plus acceptable qu'une violation de IP, Jones et Clifton (1993) défendent l'idée que, sous certaines conditions, une violation de IR – formulée telle que Jarrett le fait¹⁴ – pourrait tout aussi bien offrir la possibilité d'envoyer des signaux supraluminaux, Maudlin (1994) nie que la distinction entre IP et IR soit pertinente quant à la question de la structure causale sous-jacente, et enfin, Berkowitz (1998) avance la thèse que, bien que la distinction soit pertinente concernant les questions de l'envoi de signaux supraluminaux et du conflit avec la Relativité, elle ne l'est pas en ce qui concerne les questions d'action à distance, de causalité supraluminale, et de l'existence d'une forme de holisme. Il ne s'agit pas pour nous de présenter en détail tous ces arguments, mais plutôt de nous concentrer sur l'argument originel de Jarrett et Shimony pour l'évaluer.

Au fondement de l'interprétation commune se trouve l'argument selon lequel une violation de IP pourrait permettre en principe d'envoyer des signaux supraluminaux, tandis qu'une violation de IR non. C'est sur cet argument fondé sur la possibilité de principe d'envoi de signaux supraluminaux que nous nous concentrerons. Nous montrerons ici, avec l'aide de Jones et Clifton (1993), que l'argument ne tient pas. Bien entendu, ceci n'implique nullement que l'interprétation commune soit fautive : seulement qu'elle reste, en l'état, infondée et que donc, une évaluation rigoureuse est nécessaire (Section 3).

¹⁴ Nous précisons ce point plus loin.

Avant de présenter le résultat de Jones et Clifton et d'en analyser les conséquences, il faut noter que les conditions IR et IP sont pas définies exactement de la même façon par Jarrett et par Shimony. Elles diffèrent quant aux facteurs causaux pris en compte pour les corrélations observées. Souvenons-nous que les phénomènes de type Bell consistent essentiellement en l'observation de corrélations entre deux sous-systèmes sur chacun desquels on effectue des mesures séparées dans l'espace. On cherche ensuite à comprendre quelle est la structure causale sous-jacente qui puisse expliquer que l'on observe de telles corrélations. Plus précisément, on essaie de voir dans quelle mesure les corrélations observées peuvent se voir donner un modèle d'explication local et déterminé en termes de cause commune, i.e. se voir expliquées en terme d'une synchronisation des sous-systèmes au niveau de la source. On considère alors les facteurs causaux possibles pour les résultats d'expérience. Dans notre hypothèse, un facteur essentiel est bien l'état « caché » du système au niveau de la source. De plus, il paraît bien naturel d'inclure parmi les facteurs causaux les « paramètres » i et j des appareils de mesure de chaque côté de l'expérience, qui caractérise le type de mesure effectuée. Jarrett et Shimony incluent dans leur analyse tout ceci. Mais Jarrett ajoute à cela un autre type de facteur : les paramètres cachés des appareils de mesure, c'est-à-dire certaines caractéristiques des appareils de mesure sur lesquels les expérimentateurs n'ont pas, en pratique, d'influence, mais qui pourraient avoir de l'influence sur les résultats de mesure. Comme nous l'expliquons dans Le Bihan (2008, p. 112-116), il nous semble que l'on a aucune bonne raison d'exclure la possibilité de l'existence de tels facteurs. Si l'on veut analyser sérieusement la structure causale sous-jacente aux phénomènes de type Bell, alors il nous faut prendre en compte tous les facteurs causaux possibles. Dans la suite, nous considérerons donc les conditions suivantes :

$$(FAC^*) \quad p(A,B|\lambda,i,j,\mu,\nu) = p(A|\lambda,i,\mu) p(B|\lambda,j,\nu)$$

$$(IR^*) \quad p(A,B|\lambda,i,j,\mu,\nu) = p(A|\lambda,i,j,\mu,\nu) p(B|\lambda,j,i,\mu,\nu), \text{ et}$$

$$(IP^*) \quad p(A|\lambda,i,j,\mu,\nu) = p(A|\lambda,i,j',\mu,\nu') \text{ et } p(B|i,j) = p(B|\lambda,i',j,\mu',\nu),$$

où μ et ν représentent les paramètres cachés des appareils de mesure respectivement à gauche et à droite de l'expérience. Le problème est que, si l'on prend en considération les paramètres cachés des appareils de mesure, alors l'argument de Jarrett et Shimony en faveur de l'interprétation commune ne tient plus.

Jones et Clifton montrent qu'une violation de IR^* , associée à une dépendance des résultats vis-à-vis des paramètres cachés « locaux » (c'est-à-dire à la condition que les résultats obtenus sur un des côtés de l'expérience dépendent des paramètres cachés de l'appareil situé de ce même côté de l'expérience, ce qui, on l'admettra, est une condition des plus raisonnables), implique une violation de IP^* , dont Jarrett et Shimony ont montré qu'elle pourrait être en principe utilisée pour envoyer des signaux supraluminaires. Ceci veut dire qu'une violation de IP^* , et la possibilité de l'utiliser pour envoyer des signaux supraluminaires, n'implique pas nécessairement l'existence d'un processus causal entre les paramètres d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre : elle pourrait bien être le résultat d'un lien causal entre les résultats. Mais ce n'est pas tout. En fait, Jones et Clifton montrent qu'une violation de IR^* , associée à une dépendance des résultats vis-à-vis des paramètres cachés « locaux » implique une violation de IP^* , même dans l'hypothèse où ces résultats sont indépendants des paramètres cachés de l'appareil de mesure distant. Cette dernière condition interdit que soit utilisé le lien causal entre paramètres d'un côté et résultats de l'autre. Ceci veut dire qu'une violation de IP^* peut être le résultat d'un lien causal allant d'abord des paramètres cachés de l'appareil au résultats observés du même côté, puis de ces résultats obtenus vers les résultats observés de l'autre côté.

Tout ceci implique que, dans l'hypothèse (raisonnable) que les résultats obtenus d'un côté de l'expérience dépendent des paramètres cachés de l'appareil situé du même côté de l'expérience, on peut soutenir qu'une violation de IR^* peut être en principe utilisée pour envoyer des signaux supraluminaires, par un argument parallèle à celui offert par Jarrett et Shimony concernant les violation de IP^* . En effet, imaginons que les expérimentateurs contrôlent suffisamment l'ensemble des

variables cachées λ , μ , et ν de sorte à (1) préparer un ensemble de systèmes dans un état λ donné, (2) fixer les paramètres de l'appareil de mesure à gauche à i , μ , et (3) faire varier les paramètres de l'appareil de mesure à droite entre j , ν et j, ν' . Alors, l'expérimentateur de droite pourrait changer les résultats obtenus par l'expérimentateur de gauche en changeant les paramètres son appareil de mesure, et donc, envoyer des signaux. En utilisant un ensemble assez grand de systèmes, et en séparant assez les deux côtés, on pourrait arranger le dispositif de telle sorte que de tels signaux soient supraluminaires. On a donc, en principe, la possibilité d'utiliser une violation de IR^* pour envoyer des signaux supraluminaires.¹⁵

Par conséquent, l'argument de Jarrett et Shimony ne permet pas de justifier l'interprétation commune. Que l'on puisse utiliser une violation de IP^* pour envoyer des signaux ne permet pas de conclure qu'il existe un lien causal entre les paramètres d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre. Que l'on ne puisse pas utiliser une violation de IR^* seule pour envoyer les signaux ne permet pas non plus de conclure qu'il n'existe pas de lien causal entre les résultats. Les conditions IP^* et IR^* ne peuvent pas être considérées comme identifiant des chemins causaux bien précis. Du coup, sont aussi mises en doute les thèses concernant la localité et le holisme. Ceci, encore une fois, ne montre en aucun cas que l'interprétation commune est fautive. Seulement qu'elle reste infondée et qu'il faut l'évaluer plus rigoureusement.

3. L'interprétation commune : évaluation rigoureuse

Remettons-nous en mémoire les principales composantes de l'interprétation commune:

(LOC) IP^* est une condition de localité, i.e. une violation de IP^* seule est le signe de l'existence d'un processus non-local entre les paramètres des appareils de mesure

¹⁵ Soulignons que nous ne soutenons nullement que des tels signaux, peuvent, de fait, être envoyés avec les moyens actuels de la physique expérimentale. Il s'agit bien plutôt d'une possibilité de principe, dans l'hypothèse où nous pourrions contrôler les variables cachées. L'argument est, sur ce point, exactement parallèle à celui de Jarrett et Shimony.

d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre, tandis que IR^* n'en est pas une, i.e une violation de IR^* seule n'est pas le signe de l'existence d'un processus non-local entre les résultats de chaque côté de l'expérience;

(CAUS) IP^* est une condition de causalité, i.e. une violation de IP^* seule est le signe de l'existence d'un lien causal entre les paramètres des appareils de mesure d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre, tandis que IR^* n'en est pas une, i.e une violation de IR^* seule n'est pas le signe de l'existence d'un lien causal entre les résultats de chaque côté de l'expérience;

(HOL) une violation de IR^* indique l'existence d'une forme de holisme.

Comme nous l'avons vu, l'argument en termes de possibilité d'envoyer des signaux n'est pas suffisant pour justifier ces thèses. Comment mettre en place une évaluation plus rigoureuse ? La réponse est relativement simple : en définissant plus rigoureusement ce qu'on entend par localité, causalité, et holisme. De fait, les arguments proposés par Jarrett et Shimony n'offre aucune définition rigoureuse de ces termes. FAC, IR, IR^* , IP et IP^* sont toutes des conditions d'indépendance statistique imposées sur des distributions de probabilités sur des résultats de mesure. De telles conditions, par elles-mêmes, ne semblent pas caractériser ni la localité, ni la causalité. Concernant la localité, il est clair que c'est une notion spatio-temporelle. Il semble difficile de conclure quoique ce soit concernant la localité avant qu'on ne définisse précisément un cadre spatio-temporel pour les événements considérés. Concernant la causalité maintenant, il est bien connu que l'existence de corrélations n'est à elle-seule ni nécessaire, ni suffisante pour déterminer l'existence d'un lien causal.¹⁶ Il est impossible de conclure quoique ce soit concernant la structure causale sous-jacente sinon dans le cadre d'une théorie de la causalité rigoureuse. Voici donc la tâche qui nous incombe : définir des cadres théoriques

¹⁶ On connaît l'exemple classique selon lequel le taux de natalité en Alsace est fortement corrélé aux taux de population de cigognes. On pourrait multiplier les exemples de cas d'événements corrélés statistiquement et qui pourtant ne sont pas liés causalement, ou, inversement, d'événement liés causalement et pour lesquels nulle corrélation statistique n'est observable.

rigoureux pour évaluer les questions de localité et de causalité. Nous ne arrêterons que brièvement sur la question de la localité pour deux raisons. Premièrement parce que la discussion de cette question devient très vite assez technique. Deuxièmement parce que le résultat est positif : on peut fournir une justification rigoureuse aux thèses de l'interprétation commune concernant la localité. Les conclusions sont beaucoup plus mitigées quant aux thèses concernant la causalité. Nous devons donc donner une analyse plus détaillée. Nous pourrions ensuite nous tourner brièvement vers la question du holisme.

3.1 L'interprétation commune concernant la localité : une justification rigoureuse

Commençons par discuter brièvement de la question de la localité. La question est la suivante : les conditions FAC^* , IR^* et IP^* sont-elles des conditions de localité ? En d'autres termes, une violation de FAC^* , IR^* , IP^* par l'expérience doivent-elles être considérées comme le signe de l'existence de processus non-locaux ?

Souvenons-nous d'abord que la condition de factorisation FAC^* avait été formulée par Bell comme une condition de localité sur les modèles à variables cachées (ou modèles de type déterminé). Notons cependant que si FAC^* est une condition de localité, et étant donné que FAC^* implique la conjonction de IR^* et IP^* , il s'en suit que l'interprétation commune est fautive. En effet, toute violation de IR^* , tout comme une violation de IP^* , implique une violation de FAC^* . Donc, si FAC^* est une condition de localité, une violation de IR^* est aussi une violation de la localité. Dans ce cas, IR^* et IP^* doivent toutes deux être considérées comme des conditions de localité. De fait, Earman (1986) soutient que FAC n'est pas une condition de localité, et Le Bihan (2008, p. 168-172) montre que la justification que Bell donne pour considérer FAC^* comme une condition de localité est problématique. Voici les grandes lignes de ce dernier argument.

La justification que Bell donne pour considérer FAC comme une condition de localité est la suivante : il propose une condition de localité dont FAC peut être dérivée, d'où il suit que FAC devrait être considérée comme une condition nécessaire de localité. Tout dépend bien entendu de savoir si la condition de localité offerte au départ est

acceptable ou non. Or Bell propose que seuls soient considérés comme locaux les événements e dont les probabilités d'occurrence ne peuvent pas être modifiées par la donnée d'information concernant des événements situés en dehors de leurs cônes de lumière passés. Certes, on peut dériver FAC de cette condition. Mais Le problème est que cette même condition rend la notion de localité triviale. En effet, considérons un dispositif expérimental où un noyau radioactif émettant une particule α unique est placé au centre d'un cercle de détecteurs. Avant que la particule ne soit détectée par l'un des détecteur,s il existe une probabilité non-nulle pour chaque détecteur de détecter cette particule. Cette probabilité devient nulle dès que la particule est de fait détectée par l'un des détecteurs. Il est clair que ce n'est pas là un cas sérieux de non-localité. Et pourtant, la condition de localité proposée par Bell est violée. On ne saurait donc compter sur cette condition pour distinguer les cas de non-localité qui nous intéressent.

L'une des difficultés fondamentales consiste en ceci que les conditions FAC*, IR* et IP* sont des conditions imposées sur des distributions de probabilité d'événements. De telles conditions ne comprennent aucune référence à l'espace-temps. Or, comme nous l'avons déjà dit, la notion de localité est une notion éminemment spatio-temporelle. On ne saurait donc juger de la question de savoir si ces conditions sont des conditions de localité avant que d'inscrire les événements et leurs probabilités dans un cadre spatio-temporel rigoureux. C'est ce que se propose de faire Le Bihan (2008, chap. 6). Il est impossible d'entrer ici dans tous les détails de l'analyse, mais on peut en résumer les principes et résultats.

Pour une analyse rigoureuse, il est nécessaire de donner des versions spatio-temporelles des conditions FAC*, IR* et IP*. En d'autres termes, il faut assigner des régions de l'espace temps aux événements considérés. Une fois cela mis en place, il faut formuler une condition de localité acceptable. Il est naturel dans ce cas de prendre pour point de départ la notion de localité définie par Einstein en théorie de la Relativité. Cette notion ne saurait être utilisée directement en revanche, puisqu'elle ne s'applique pas au cas stochastique. Il faut donc formuler une version stochastique de la localité d'Einstein. Enfin, il reste à comparer cette condition de

localité avec les versions spatio-temporelles de FAC*, IR*, et IP*. Le résultat de cette analyse est le suivant : IP* doit être considéré comme une condition de localité, mais FAC* et IR* non. IR* correspond en réalité à l'une des conditions du principe de cause commune de Reichenbach qui ne saurait compter comme une condition de localité.¹⁷ Le résultat est que les thèses de l'interprétation commune concernant la localité peuvent être justifiées de façon rigoureuse. Il ne s'en suit pas cependant que l'interprétation commune soit complètement justifiée : du fait qu'une violation de IP* constitue un cas de non-localité il ne s'en suit pas que le processus sous-jacent soit causal ; et du fait qu'une violation de IR* ne correspondent pas à un cas de non-localité ne s'en suit ni l'absence de processus causal sous-jacent, ni la présence d'une forme de holisme. Les thèses concernant la causalité et le holisme restent donc à évaluer.

3.2. L'interprétation commune concernant la causalité : une évaluation plus mitigée

Il existe en gros deux types de théorie de la causalité. Le premier type de théorie est caractérisé par une orientation métaphysique. De telles théories considèrent les structures causales comme des structures fondamentales, et tentent de les caractériser comme telles. On trouve ici principalement les théories contrefactuelles de la causalité (Lewis 1973), ainsi que les théories spatio-temporelles (Salmon 1984, 1998, Dowe 2000). Le second type de théorie est d'inspiration empiriste : elles ne tentent pas de caractériser une notion de cause qui soit constitutive de la structure fondamentale du monde, mais seulement de donner des critères empiriques pour déterminer les structures causales au niveau des phénomènes. Quant à la question de savoir si ces structures causales empiriques correspondent ou non à des structures au niveau de l'ontologie fondamentale, il est recommandé de rester, sinon sceptique, du moins agnostique. Parmi ces théories d'inspiration empiriste se trouvent principalement les théories interventionnistes telles que celle

¹⁷ Le principe de cause commune de Reichenbach est en gros le principe selon lequel des corrélations doivent être expliquées en terme d'une cause commune dans le passé (comme dans le cas des corrélations entre l'humeur de Alain et Bernard). Il fait toujours l'objet de discussions et de controverses. Pour une synthèse récente, voir Arntzenius (2010).

développée par Woodward (2003). Il ne s'agit pas ici de prendre position quant à la question de savoir laquelle de ces théories donne la meilleure caractérisation de la causalité. Le but est de voir si, parmi ces théories, il en est une qui permette de justifier l'interprétation commune des théorèmes et des expériences de type Bell.

Les défenseurs de l'interprétation commune sont pour la plupart dans le camp des métaphysiciens et non des empiristes – souvenons-nous de l'ambitieux projet de « métaphysique expérimentale ». Il est donc naturel de se tourner d'abord vers les théories à visée métaphysique dans notre tentative de justification de leurs vues. Seules des théories de ce type pourraient permettre de justifier les thèses constituant l'interprétation commune comme valant au niveau de l'ontologie fondamentale et non seulement au niveau des phénomènes empiriques. Commençons par les théories spatio-temporelles.

3.2.1 L'interprétation commune et les théories spatio-temporelles de la causalité

Nous savons tous que toute corrélation n'est pas le signe d'une relation causale. Quelle propriété fondamentale caractérise alors les interactions proprement causales ? Comment reconnaître les structures causales fondamentales de l'univers, et en particulier comment les distinguer des phénomènes qui n'ont que l'apparence de la causalité ? Ce sont là certaines des questions auxquelles les théories spatio-temporelles de la causalité tentent de répondre.

L'intuition qui se trouve au fondement de ces théories est la suivante : les interactions proprement causales sont celles qui font entrer en jeu des processus impliquant de véritables objets dont on peut tracer l'histoire causale dans l'espace et le temps. Tout ceci mérite d'être précisé bien entendu, mais l'essentiel est là : la structure causale du monde est constituée d'objets dont les histoires se déploient et se croisent dans l'espace-temps.

Notons que cette caractérisation des processus et interactions proprement causaux comprend deux éléments. Premièrement, les processus et interactions proprement causaux sont caractérisés par la possibilité d'en tracer l'histoire, c'est-à-dire d'en

identifier la trajectoire dans l'espace-temps. Mais ce n'est pas suffisant. Par exemple, les ombres de deux voitures peuvent bien se déplacer dans l'espace-temps de façon continue avant de se rencontrer. Or on accordera que ce ne sont là ni des processus causaux véritables, ni une interaction causale véritable. Ce sont les voitures elles-mêmes et non leurs ombres qui constituent les processus causaux véritables, et c'est l'accident qui est l'interaction causale véritable. Comment caractériser alors les processus et interactions véritablement causaux ? Comment distinguer entre les structures causales fondamentales de l'univers et la « camelote spatio-temporelle ».¹⁸ La réponse que Salmon et Dowe donne à cette question est la suivante : les processus et objets véritables sont caractérisés par la possession et la transmission d'une quantité physique conservée.¹⁹ Des voitures – et non leurs ombres – sont caractérisées par une masse, de l'énergie, et le choc entre ces voitures – et non entre leurs ombres – est un échange d'énergie. C'est ce qui donne à ces processus et interactions pour ainsi dire de la « substance ». Plus précisément maintenant, les théories spatio-temporelles de la causalité définissent un processus causal comme la ligne d'univers²⁰ d'un objet qui transmet à chaque instant de son histoire une quantité fixe non-nulle d'une quantité conservée ; et une interaction causale comme l'intersection des processus causaux dans laquelle s'opère un échange de quantité physique conservée.

Que dire maintenant de la causalité probabiliste ? Comment caractériser les processus et interactions causaux quand les causes ne produisent pas toujours les

¹⁸ Traduction de « spatio-temporal junk », l'expression étant de Kitcher (1989).

¹⁹ Salmon et Dowe diffèrent légèrement quant à la caractérisation qu'ils donnent des processus proprement causaux. En particulier, Dowe se fonde sur une notion primitive d'objet, et rejette l'idée d'une nécessaire transmission par l'objet d'une quantité conservée le long son histoire. Sans prétendre pouvoir décider ici de cette question controversée, nous nous rangerons ici aux côtés de Salmon pour la simple raison que la notion d'objet en physique quantique est fortement problématique, et que donc, prendre cette notion comme primitive semble peu recommandé.

²⁰ Une ligne d'univers est une trajectoire dans l'espace-temps à quatre dimensions. Décrire une ligne d'univers, ce n'est rien d'autre que faire le rapport de l'histoire des déplacements d'un système physique – comme le fait le capitaine pour son navire dans son carnet de bord.

mêmes effets, mais produisent des effets dont on ne connaît que la probabilité ? Salmon n'a pas pu développer complètement sa théorie sur ce point. Voici cependant ce qu'il nous dit. Un processus causal probabiliste est caractérisé par la transmission d'une distribution de probabilité de résultats possibles pour les interactions causales à venir. Par exemple, un atome radioactif possède une certaine probabilité de désintégration. Toute transition vers un niveau d'énergie différent est une interaction causale entre l'atome en question et le photon qui est soit absorbé soit émis à cette occasion. Le processus causal « atome » transporte avec lui une probabilité de distribution, qui se voit modifiée à chaque interaction.

Quels que soient les différentes façons dont on peut envisager de compléter cette théorie de la causalité probabiliste, les éléments fondamentaux de la théorie sont en place : pour déterminer les structures causales fondamentales de l'univers, il nous faut déterminer quels sont les processus et les interactions qui sont proprement causaux. Et ceci peut se faire en regardant lesquels des processus et interactions dont on peut tracer l'histoire dans l'espace-temps transportent avec eux et peuvent transmettre une quantité physique conservée. Qu'en est-il dans le cas des phénomènes de type Bell ?

La réponse à cette question dépend du type de lignes d'univers que l'on accepte comme légitimes. Plus précisément, tout dépend de si oui ou non on accepte des courbes de genre espace (les trajectoires dans l'espace à temps constant, i.e. les déplacements instantanés) parmi les lignes d'univers. Si les courbes de genre espace sont interdites, alors les deux seuls processus causaux possibles sont les deux lignes d'univers qui se rendent depuis la source vers chacun des appareils de mesure. Dans ce cas, les structures causales possibles pour les phénomènes de type Bell semblent pouvoir être les suivantes :

(a) l'état au niveau de la source (λ) est une cause commune pour les résultats observés ;

(b) nous avons un cas de causalité qui remonte dans le temps, depuis les résultats vers la source.

Etant donné que les expériences de type Bell excluent le cas (a), il ne reste que (b) : si les courbes de genre espace ne sont pas des lignes d'univers, alors les phénomènes de Bell doivent être interprétés comme un cas de causalité vers le passé. On peut envisager par exemple une « séquence » causale de la forme suivante : un processus causal se déploie depuis la source vers le résultat obtenu sur l'un des appareils de mesure, puis retourne à la source en remontant dans le temps, pour repartir vers le second appareil de mesure, muni des éléments nécessaires pour produire un résultat corrélé avec le premier (voir Dowe 2000 pour plus de détails). Comme on le voit, s'il n'est pas possible dans ce cadre d'envisager qu'une violation de IR^* doive être interprétée comme signalant l'existence d'une interaction causale entre les résultats de chaque côté de l'expérience, on ne saurait pas plus envisager qu'une violation de IP^* doive être interprétée comme signalant une interaction causale entre les paramètres d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre côté. On peut donc conclure que dans le cas où les courbes d'espace ne sont pas des lignes d'univers, l'interprétation commune ne peut être justifiée en faisant appel aux théories spatio-temporelles de la causalité.

Considérons maintenant le cas où les courbes de genre espace sont acceptées comme lignes d'univers, c'est-à-dire, le cas où sont acceptées des déplacements à des vitesses supérieures à celle de la lumière – par exemple sous la forme de trajectoires tachyoniques. Dans ce cas, en plus de processus causaux se déployant depuis la source vers les appareils de mesure, on pourrait avoir des processus causaux entre les résultats, ou bien entre les paramètres d'un côté et les résultats de l'autre, ou les deux. Le résultat obtenu par Jones et Clifton (voir Section 2.2) implique en effet que l'on pourrait, au moins en principe, obtenir des transmissions de probabilité déterminées aussi bien du fait d'une interaction causale entre les résultats de chaque côté que du fait d'une interaction causale entre les paramètres d'un côté et les résultats de l'autre. Nous nous retrouvons donc avec plusieurs structures causales sous-jacentes possibles :

(a) l'état au niveau de la source (λ) est une cause commune pour les résultats observés ;

(b) nous avons un cas de causalité qui remonte dans le temps, depuis les résultats vers la source ;

(c) il existe une interaction causale (de type tachyonique) soit entre les résultats de chaque côté, soit entre les paramètres d'un côté et les résultats de l'autre;

Encore une fois, l'option (a) est exclue du fait du résultat de Bell. Mais (b) et (c) sont possibles, et également justifiables du point de vue des théories spatio-temporelles de la causalité. L'interprétation commune ne peut donc être justifiée au moyen de ces théories que si on ajoute les contraintes suivantes :

(1) la causalité vers le passé est interdite (l'option (b) est alors éliminée) ;

(2) il existe des influences tachyoniques (l'option (c) reste possible);

(3) ces influences tachyoniques existent entre les paramètres d'un côté et les résultats de l'autre, mais non pas entre les résultats de chaque côté.

Les contraintes (1) et (2), même si elles demandent clairement à être justifiées indépendamment – au moyen d'une interprétation précise de l'ontologie associée à la théorie, ne semblent pas problématiques. Plus difficile est de voir comment faire appel à (3) sans se voir enfermé dans un argument circulaire. Et ici encore, aucune justification ne semble pouvoir être donnée en dehors d'une interprétation précise des types d'entités et d'interactions que l'on accepte dans notre ontologie. Ce qui revient à dire que les théories spatio-temporelles de la causalité ne sauraient justifier l'interprétation commune que dans le cadre d'une interprétation précise de la théorie.²¹

3.2.2. L'interprétation commune et la théorie contrefactuelle de la causalité

Il est une autre théorie métaphysique de la causalité, qui plus fut plus complètement développée par son père fondateur que celle de Salmon: la théorie contrefactuelle de la causalité. L'intuition est ici relativement simple et remonte à une des

²¹ Il serait intéressant de faire l'analyse dans le cadre des interprétations communes de la mécanique quantique, en particulier de celle de type Bohm ou GRW.

caractérisation que Hume (1748, Section VII) donne de la causalité, quand il dit qu'il y a relation de cause à effet entre deux objets donnés « quand, si le premier n'avait pas été, le second n'aurait jamais existé ». L'intuition est donc la suivante : une cause, pour le dire grossièrement, c'est quelque chose qui « fait la différence », a un certain impact sur la façon dont les choses se passent (ou ne se passent pas) : « ah, sans toi, je n'aurais jamais pu réussir ! », « ah, si seulement je n'avais pas oublié de mettre du sucre dans le gâteau... », ou, de façon plus dramatique : « ah, si Oswald n'avait pas assassiné JFK... ». Une cause, en fin de compte, c'est quelque chose sans quoi certains effets ne sauraient se produire.

Ni Hume, ni aucun des empiristes à sa suite, ne développèrent plus avant cette idée : ils se contentèrent de concevoir la causalité en termes de régularités empiriques. C'est qu'une difficulté de taille se présentait : l'analyse rigoureuse des conditionnels contrefactuels. En quel sens en effet peut-on dire qu'un conditionnel contrefactuel – « si je n'avais pas oublié le sucre, mon gâteau serait bien meilleur » – est vrai ? Quelles en sont les conditions de vérité ? Précisément, cela n'a pas eu lieu. Qu'est-ce qui nous permet alors de dire que ce conditionnel est vrai ? C'est là une question qui est loin d'être triviale. David Lewis (1973, 1986) put donner ses lettres d'honneur à la théorie contrefactuelle de la causalité, en grande partie parce qu'il parvint aussi à donner un cadre rigoureux à la sémantique des conditionnels contrefactuels.²² Ce cadre rigoureux fait usage du réalisme modal, où la vérité des conditionnels contrefactuels est conçue en termes de mondes possibles. Lewis eut l'idée de placer sur l'ensemble des mondes possibles une mesure de « proximité » des mondes. Il nous est impossible ici d'en faire un exposé détaillé : il suffira de dire que l'on suppose ici que les mondes possibles sont plus ou moins similaires au monde actuel et que cette similarité peut être plus ou moins grande. On peut alors ordonner les mondes selon leur degré de similarité avec le monde actuel, ordre sur lequel se base la mesure de proximité. Le conditionnel contrefactuel « si *a* n'avait pas eu lieu, alors *b* n'aurait pas eu lieu non plus » est alors dit vrai dans le monde actuel si et

²² L'interprétation Lewisienne des conditionnels contrefactuels reste cependant le sujet de controverses.

seulement si, ou bien a a lieu dans tous les mondes possibles (auquel cas le conditionnel est trivialement vrai), ou bien, parmi les mondes où a n'a pas lieu, ceux dans lesquels b n'a pas lieu non plus sont plus proches du monde actuel que les mondes dans lesquels b a lieu.

Lewis peut ensuite user des conditionnels contrefactuels pour définir la notion de dépendance causale entre deux événements a et b : a et b étant deux événements distincts, b dépend causalement de a si et seulement si, si a n'avait pas lieu, b n'aurait pas lieu non plus. Notons que la dépendance causale est suffisante pour qu'il y ait relation de cause à effet, mais pas nécessaire : il peut y avoir relation de cause à effet entre deux événements c et e si il existe une chaîne de dépendances causales entre eux sans qu'ils dépendent nécessairement causalement l'un de l'autre directement : si c est cause de a du fait que a dépend causalement de c , et si a est cause de e du fait que e dépend causalement de a , alors, selon Lewis, c est cause de e , bien qu'il se peut que e ne dépende pas causalement de c . La notion de chaîne de dépendance causale permet d'assurer la transitivité de la causalité bien que la dépendance causale ne soit, elle, pas transitive. Notons aussi qu'une telle chaîne ne peut aller que dans le sens de la dépendance causale, et non pas remonter des portions de chaînes. Considérons le cas où l'événement d est la cause de c et de e , selon un schéma de cause commune, par exemple : fumer cause le cancer des poumons et le jaunissement des doigts. On ne saurait dire que d dépendant causalement de e , et c , dépendant causalement de d , e peut être considéré comme une cause de c : le jaunissement des doigts n'est pas une cause de cancer.

Que dit enfin la théorie concernant le cas non-déterministe ? Dans ce cas, Lewis modifie la définition de la dépendance causale en faisant appel à la notion de chance : étant donnés deux événements actuels et distincts c et e , e dépend causalement de c si et seulement si, si c n'avait pas eu lieu, les chances d'occurrence de e serait bien moindres que ses chances actuelles, ce qu'on peut écrire de la façon suivante, avec $O(.)$ désignant l'occurrence d'un événement, $pr(.)$ désignant une fonction assignant des chances à l'occurrence d'événements juste après que e a ou n'a pas eu lieu, et x un nombre entre 0 et 1 :

$$O(c) \rightarrow pr(O(e)) = x;$$

$$\neg O(c) \rightarrow pr(O(e)) \ll x.$$

Peut-on maintenant appliquer la machinerie de la causalité contrefactuelle aux situations de type Bell ? A première vue, il n'est pas évident que l'on puisse lier la notion de causalité, comprise en termes de conditionnels contrefactuels, et la notion de dépendance statistique formulée en termes de probabilités conditionnelles. Ce sont là, formellement, deux choses très différentes. Butterfield (1992) parvient cependant à faire le lien en utilisant le fait que, selon la théorie de Lewis, l'évolution des chances d'un événement donné se fait par conditionnalisation sur l'histoire de cet événement. Butterfield montre alors que obtenir l'indépendance statistique entre les résultats par conditionnalisation sur leurs histoires passées est équivalent à obtenir que soient égales les chances actuelles et contrefactuelles d'un des deux résultats juste après que l'autre résultat est obtenu. Or précisément le défenseur de la théorie contrefactuelle de la causalité se doit de maintenir que, s'il n'y a pas causalité entre les résultats, les chances actuelles d'un résultat sont égales à ses chances contrefactuelles. Il se trouve alors contraint d'admettre également que, s'il n'y a pas causalité, les deux résultats sont indépendants statistiquement par conditionnalisation sur leurs histoires passées, ce qui n'est autre que dire que IR et IR* sont satisfaites. A l'inverse donc, si l'indépendance des résultats n'est pas satisfaite, cela implique qu'il y a causalité, et l'interprétation commune tombe.

Il est sans doute des façons de modifier ou bien la vision que l'on a de la situation – comme par exemple la définition des événements, ou bien la théorie Lewisienne elle-même, afin d'éviter la conclusion de Butterfield. Il n'en reste pas moins que, si on applique telle quelle la théorie Lewisienne aux situations de Bell, alors il n'est pas possible de justifier la thèse selon laquelle une violation de IP* est le signe d'une

relation causale entre les paramètres d'un côté et les résultats de l'autre, tandis qu'une violation de IR* n'est pas le signe d'une relation causale entre les résultats.²³

3.2.3. L'interprétation commune et les théories interventionnistes de la causalité

A la différence des théories d'esprit métaphysique telles que les théories spatio-temporelles et les théories contrefactuelles de la causalité, les théories interventionnistes sont explicitement d'inspiration empiriste. Le monde est conçu comme un ensemble d'événements au sein desquels nous observons certaines régularités, certains réseaux de relations, que nous appelons structures causales. Le but que se donne les théories interventionnistes de la causalité est de donner des critères empiriques pour distinguer, au sein de ces phénomènes observables, entre les relations causales et les corrélations accidentelles. La question de savoir si de telles relations causales au niveau des phénomènes correspondent ou non à des connections nécessaires au niveau fondamental est laissée ouverte. Les défenseurs des théories interventionnistes prennent au sérieux les leçons tirées des arguments de Hume, selon lesquels on ne saurait ni observer empiriquement ni déduire rationnellement l'existence des connexions causales nécessaires, interdisant toute ambition métaphysique aux théories de la causalité.

L'une des théories les moins controversées parmi les théories interventionnistes est la théorie de Woodward (2003). L'intuition au fondement de cette théorie est la suivante : une relation causale offre des possibilités de manipulation : si je titille le système de ce côté, alors je peux compter obtenir tel ou tel changement de l'autre. De façon plus rigoureuse, on donne le critère suivant : une variable X est une cause d'une variable Y , respectivement à l'ensemble de variable S , si et seulement si il est possible d'intervenir sur les valeurs de X , et la valeur de Y subit des changements invariants à la suite de cette intervention (Figure 5).

²³ On notera que Lewis a modifié sa théorie dans Lewis (2000). Il serait intéressant d'analyser si les conclusions de Butterfield sont affectées ou non par ces changements. C'est un projet que nous devons cependant laisser pour plus tard.

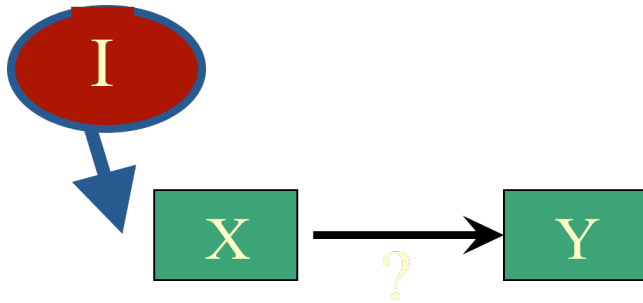


Figure 4 : Selon les théories interventionnistes de la causalité, on a une relation causale entre X et Y si et seulement si on peut intervenir au niveau de X pour changer les valeurs de Y .

Prenons un exemple. Considérons un circuit électrique où l'on a placé un générateur, une résistance, et un ampèremètre permettant de mesurer l'intensité du courant. Il est alors possible de vérifier que le générateur est bien la cause de la circulation du courant : toute modification de la tension au niveau du générateur résultera en une modification de l'intensité mesurée par l'ampèremètre en accord avec la loi de Coulomb : $\Delta U = R\Delta I$.

Soulignons trois aspects cruciaux du critère ci-dessus. D'abord, notons que l'on parle de relations causales entre *variables*, qui peuvent prendre différentes valeurs. Ceci permet à la fois de modifier la valeur de la variable-cause, et d'observer des changements de valeur au niveau de la variable-effet. Remarquons ensuite qu'une variable est dite *cause* d'une autre variable seulement *par rapport à un ensemble de variables donné*. Ceci est important parce que c'est là un des signes de l'orientation empiriste des théories interventionnistes. Il ne s'agit pas de parler de relation de cause à effet « tout court », mais bien *relativement* à un certain contexte d'expérience donné : dans la plupart des situations concrètes, il est pratiquement impossible de déterminer l'ensemble exhaustif des facteurs causaux. On doit alors se résoudre à accepter que la détermination des relations de cause à effet est relative, et donc possiblement provisoire. Soulignons enfin l'importance de la notion d'invariance : on reconnaît une véritable cause à ce que les effets observent une loi

invariante. Dans notre exemple, les changements obtenus au niveau de l'intensité du courant obéissent à la loi de Coulomb.

Il nous faut ensuite en dire un peu plus concernant la notion d'intervention qui apparaît dans le critère ci-dessus. Une intervention est une action d'activation sur la cause supposée, action censée déclencher le processus (causal) par lequel des changements s'opèrent au niveau de l'effet. Certaines conditions doivent être respectées pour que la notion d'intervention s'applique : (1) l'intervention doit bien être cause de changements de valeur au niveau de la cause supposée X ; (2) elle doit être la *seule* cause de changements de valeur au niveau de la cause supposée X ; et (3) elle ne doit être cause de changements de valeur *que* pour la cause supposée X . Ces conditions ne sont autres que des moyens d'assurer que la relation entre cause et effet est bien isolée, ou, si l'on veut, « sous contrôle ». On peut facilement illustrer cette idée au moyen des précautions prises lors des études médicales. Pour étudier l'efficacité d'un médicament X , il faut (1) que la prise de médicament ait bien un effet sur les sujets d'étude (il ne faut pas, par exemple, que les sujets d'étude ait une certaine condition médicale qui fasse que le principe actif du médicament ne leur fait rien) ; (2) que la prise de médicament soit le seul facteur de changement (il ne faut pas, par exemple, que ces sujets aient absorbé une autre substance qui diminue ou augmente le principe actif du médicament) ; et (3) que la prise de médicament soit cause de changement seulement au niveau de la cause (il ne faut pas par exemple qu'il y ait de court-circuit depuis l'intervention vers l'effet, comme dans le cas d'un effet placebo, où la simple prise d'une pilule quelconque a une influence sur l'effet étudié). Il s'agit donc de ne laisser aucun autre facteur intervenir, ni au niveau de la cause, ni au niveau de l'effet (Figure 6).

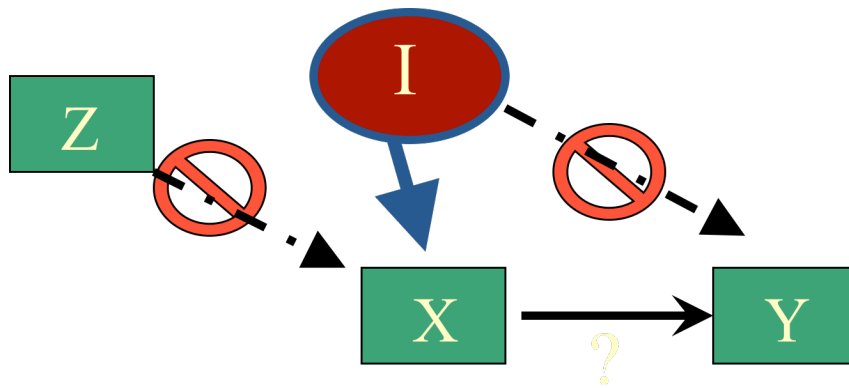


Figure 6 : Une intervention doit être la seule cause de changement au niveau de X , et uniquement au niveau de X .

Qu'obtient-on si on applique maintenant cette théorie aux situations de type Bell ? Peut-on justifier l'interprétation commune dans le cadre des théories interventionnistes de la causalité? Considérons premièrement un cas de violation de IP^* . L'interprétation commune est qu'une telle violation est le signe de l'existence d'une relation causale entre les paramètres d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre. Traduit dans le langage des théories interventionnistes de la causalité, une violation de IP^* consiste en ce que des changements imposés au niveau des paramètres (cachés ou non) d'un côté de l'expérience résultent en des changements au niveau du résultat de l'autre côté de l'expérience, l'état à la source restant fixe. Cela semble donc bien être un cas de relation causale. Le problème ici est que les conditions requises pour pouvoir tester le chemin qui va des paramètres d'un côté de l'expérience aux résultats de l'autre ne sont pas remplies : il se peut en effet que l'intervention au niveau des paramètres d'un côté ait une influence sur les résultats de l'autre au moyen d'une relation de cause à effet directe, mais il est tout également possible que la relation de cause à effet ait pris un chemin différent : des paramètres sur lesquels on est intervenu aux résultats du même côté – qui ne sont pas fixés par IP^* , puis des résultats de ce côté aux résultats de l'autre côté. Une violation de IP^* par elle-même n'indique donc pas l'existence d'une relation causale entre les paramètres d'un côté et les résultats de l'autre. Ils existent plusieurs chemins causaux pouvant y correspondre.

La seule solution pour justifier l'interprétation commune serait de montrer que le chemin alternatif ne saurait être emprunté. En d'autres termes, il faudrait pouvoir montrer que ce n'est pas là un chemin causal possible. Comme il paraît difficile de nier qu'il puisse y avoir une relation de cause à effet depuis les paramètres vers les résultats du même côté de l'expérience, il nous faudrait donc montrer qu'il ne saurait y avoir de relation de cause à effet entre les résultats de chaque côté. Mais tout cela semble être de bonne augure pour l'interprétation commune. Si on pouvait (1) montrer que OI^* correspond au chemin causal existant potentiellement entre les résultats de chaque côté et (2) vérifier ensuite qu'un tel chemin causal n'existe pas, alors l'interprétation commune se trouverait justifiée.

Considérons donc OI^* et ses violations potentielles. Premièrement, il semble que cette fois un seul chemin causal soit identifié. En effet, OI^* (ou sa violation) consiste en l'indépendance (ou la dépendance) des résultats de chaque côté de l'expérience, et ceci avec toutes les autres variables fixées. Il n'y a donc pas d'autre chemin causal possible. Une violation de OI^* correspond-t-elle à une relation de cause à effet suivant ce chemin précis ? Selon l'application stricte des théories interventionnistes, la réponse est non, et ce, tout simplement parce que, dans la situation donnée, aucune intervention sur les résultats n'est possible : tous les facteurs causaux connus au moyen desquels on pourrait imposer des changements au niveau des résultats sont en effet fixés ! Or souvenons-nous du critère donné par les théories interventionnistes : pour qu'il y ait cause, *il faut qu'il existe* une intervention, et que cette intervention produise les changements voulus. Du fait de cet énoncé existentiel, l'absence d'intervention se traduit par une absence de cause. La conclusion est donc ici que (1) OI^* correspond bien au chemin causal entre les résultats de chaque côté, et que (2) on ne saurait conclure à l'existence d'une relation de cause à effet suivant ce chemin. Au bout du compte donc, l'interprétation commune peut bien être justifiée dans le cadre des théories interventionnistes de la causalité.

Le lecteur froncera sans doute des sourcils à la lecture de l'analyse de OI^* . Comment, se dit-on, peut-on déduire l'absence de relation de cause à effet de l'impossibilité

dans laquelle nous nous trouvons d'en vérifier l'existence dans les conditions voulues, i.e. au moyen d'une intervention? Il semblerait plus raisonnable de conclure seulement que l'on est dans l'incapacité de juger s'il y a relation de cause à effet ou non, non pas qu'une telle relation est inexistante. Après tout, il se peut bien qu'il existe une relation de cause à effet, même si nous sommes dans l'incapacité de le vérifier. Mais ce serait là oublier l'esprit foncièrement empiriste des théories interventionnistes. Souvenons-nous que nul intérêt n'est ici porté aux spéculations quant à l'existence des relations causales au niveau fondamental. Ce qui nous importe ici, c'est de déterminer les structures causales au niveau des phénomènes. Dans le cas où une telle détermination n'est pas possible, même en principe, alors la discussion doit s'arrêter sous peine de déroger aux principes empiristes. Ceci veut dire que, si les théories interventionnistes fournissent un cadre dans lequel l'interprétation commune peut être justifiée, elles ne le font qu'au niveau des phénomènes observables, et non au niveau fondamental. Une telle justification ne permet donc de tirer aucune conclusion métaphysique quant à la nature profonde de l'univers. Tout ce qu'on peut conclure, c'est que, au niveau empirique, une violation de IP* seule peut être considérée comme le signe d'une relation de cause à effet entre les paramètres d'un côté de l'expérience et les résultats de l'autre, tandis qu'une violation de OI* ne saurait être considérée comme le signe d'une relation de cause à effet entre les résultats de chaque côté. Ainsi, l'interprétation commune peut se trouver justifiée dans le cadre des théories interventionnistes de la causalité, mais une telle justification ne vaut qu'au niveau des phénomènes et non au niveau de l'ontologie fondamentale.

Conclusion

Que dire donc des corrélations quantiques de type Bell? Ce qui est certain, c'est qu'une explication en termes de processus causaux locaux et déterminés se déployant depuis une cause commune vers les phénomènes corrélés observés est impossible. Par conséquent, toute théorie quantique doit abandonner au moins un élément de ce mode d'explication habituel pour les corrélations de type Bell. C'est là le résultat incontestable du théorème de Bell et des expériences qui y sont associées.

Peut-on conclure de cela que « l'expérience montre » que le monde est fondamentalement non-local, ou bien que les propriétés des systèmes sont en général indéterminées et se trouvent fixées seulement par l'observation, ou bien qu'il existe une forme de holisme au niveau de l'ontologie fondamentale, ou bien qu'il faut concevoir la causalité comme pouvant se déployer du futur vers le passé ? La réponse à cette question est simple : non, l'expérience n'a rien montré de tel. Ce que l'expérience montre, c'est que toute théorie quantique devra donner une image du monde comportant certains éléments de bizarrerie, en conflit avec certaines de nos intuitions classiques. Différents choix sont ouverts, dont tous ceux formulés plus haut, et ce choix est une question d'interprétation.

Interpréter une théorie physique consiste à proposer une image du monde qui soit compatible à la fois avec la théorie et les observations. Une interprétation comporte d'abord une ontologie fondamentale : on y décrit de quelles sortes d'entité le monde peut être constitué si la théorie est vraie. Dans le cas de la théorie quantique comme dans beaucoup d'autres, les types d'ontologie possibles diffèrent radicalement de la façon dont les choses nous apparaissent au niveau phénoménal. Toute interprétation sérieuse doit donc, en plus de donner une ontologie compatible avec la théorie, expliquer comment il peut se faire que cette ontologie nous apparaisse sous la forme de phénomènes tels que nous les observons. Si par exemple on adopte l'interprétation selon laquelle les propriétés des systèmes sont indéterminées au niveau fondamental, on se doit d'expliquer comment il se fait que nous n'observons typiquement que des systèmes aux propriétés bien déterminées.

Interpréter une théorie n'a rien d'un jeu arbitraire. De même que l'expérience pose un certain nombre de contraintes sur les théories possibles, les théories posent des contraintes sur les « mondes possibles » que l'on peut y associer. Dans le cas des phénomènes quantiques, l'existence des corrélations quantiques de type Bell constitue l'une des contraintes les plus importantes sur les théories possibles ainsi que sur leurs interprétations.

Au vu des résultats d'expérience de type Bell, certains ont pris peur qu'on ait là une preuve de l'existence d'une forme de non-localité en contradiction avec les principes de la relativité. Si l'analyse donnée en section 3.1. est correcte, alors ces craintes sont infondées. Laissant de côté les controverses quant à l'interprétation de la relativité elle-même, on peut dire, comme l'avait suggéré Shimony, qu'il règne une forme de coexistence pacifique entre les deux théories, si on renonce à IR^* pour sauvegarder IP^* . Il reste dans ce cas à interpréter la violation de IR^* .

L'interprétation commune est que les violations de IR^* sont le signe d'un lien non causal entre les résultats de chaque côté de l'expérience. Ce lien non-causal est souvent alors interprété en terme de holisme, c'est-à-dire que ce que nous prenions pour deux sous-systèmes séparés dans l'espace serait en réalité un seul système étendu dans l'espace. Il nous faudrait donc, selon cette interprétation, abandonner l'intuition commune selon laquelle les systèmes physiques sont bien localisés dans l'espace. Notre analyse montre que, contrairement à ce que semble soutenir la plupart des défenseurs de l'interprétation commune, cette thèse ne peut trouver de justification que si elle n'a aucune ambition métaphysique et en reste au niveau empirique. A moins que l'on ajoute des éléments d'interprétation concernant les types d'entités et d'interactions possibles, seules en effet les théories interventionnistes de la causalité permettent-elles de conclure que la violation de IR^* ne correspond pas à une relation causale. Or ces théories n'ont pas pour ambition de déchiffrer la fabrique du réel au niveau fondamental, mais seulement de décrire les structures causales au niveau des phénomènes. Comment pourrait-on comprendre la notion de holisme si elle doit être restreinte au niveau empirique ?

On peut tenter d'esquisser ici une réponse. En tant qu'agent épistémique, nous naviguons le monde en le « taillant » d'une certaine façon. Plus précisément, nous concevons le monde tel qu'il nous apparaît comme constitué d'individus interagissant causalement dans l'espace et le temps. Il nous faut donc distinguer entre ce que nous prenons pour des individus (des systèmes) et ce que nous prenons pour des interactions entre ces systèmes. Les critères de causalité donnés par les théories interventionnistes, loin de nous fournir une voie pour découvrir la

structure ontologique fondamentale du monde, pourrait bien être conçus comme des critères nous permettant de structurer le monde de cette façon. Certaines corrélations seront appréhendées comme correspondant à des interactions causales, mais pas toutes. Que dire donc des corrélations qui ne correspondent pas à des relations causales ? Certaines pourraient bien être interprétées comme un signe d'appartenance à un même individu. Qu'est-ce donc qu'un individu, au niveau empirique, sinon un ensemble d'éléments si bien corrélés entre eux qu'on ne les conçoit même pas comme séparés? Bien entendu, une telle conception de l'individu, ou du système, est très largement épistémologique et n'implique rien au niveau ontologique. Certains trouveront que c'est mieux ainsi. Certains autres exigeront une analyse métaphysique au delà des seuls phénomènes empiriques.

Nous avons montré qu'on ne saurait se lancer dans une telle analyse que si l'on complète l'interprétation donnée au formalisme de la mécanique quantique. On pourrait par exemple tenter de définir une forme de holisme fondamental dans le cadre de l'interprétation multi-monde de la mécanique quantique. L'entité fondamentale, constitutive de la fabrique du monde, est la fonction d'onde universelle. Les relations d'intrication telles que celles qui caractérisent les systèmes de type Bell sont alors la règle et non l'exception. Le monde tel que décrit par la fonction d'onde universelle est fondamentalement intriqué. Comment se fait-il alors que nous n'observions pas d'intrication au niveau des phénomènes ? C'est là toute la force de l'interprétation multi-mondes : la fonction d'onde universelle peut être conçue non comme décrivant un monde unique, mais une infinité de mondes dans lesquels les propriétés des systèmes physiques comme celles des observateurs sont bien définies.²⁴

Notons que d'autres possibilités d'interprétation nous sont ouvertes. Si l'idée d'une ontologie constituée d'une fonction d'onde universelle fondamentalement intriquée apparaissant sous la forme d'une infinité de mondes bien déterminés n'est pas au goût du lecteur, il peut opter pour l'une des deux autres interprétations les plus

²⁴ Voir l'article d'Adrien Barton dans ce volume pour plus de détails.

importantes et les mieux développées de la mécanique quantique. Les interprétations de type Bohm rejettent l'idée que l'ontologie fondamentale puisse être si différente de tout ce que nous pouvons concevoir. Elles optent donc pour ce que leurs défenseurs appellent une « ontologie claire » : dans le cas de Bohm, des particules aux propriétés bien déterminées interagissant dans l'espace-temps de façon déterministe. Les théories GRW peuvent être conçues comme procédant d'une même intuition.²⁵ Ces deux théories prennent donc le parti d'abandonner IP* au lieu de IR*, considérant que IR* est un élément crucial de la façon dont nous pouvons comprendre le monde. Le prix à payer, est, on l'aura compris, une forme de non-localité qu'il faut tâcher de réconcilier avec la théorie de la relativité. Les efforts en ce domaine sont cependant prometteurs.

Au bout du compte donc, les expériences de type Bell n'imposent aucune métaphysique définitive, mais semblent bien en revanche, pour quiconque n'est pas satisfait par une vision purement instrumentaliste ou pragmatiste de la science, imposer que l'on mette le travail d'interprétation de la théorie quantique parmi les tâches les plus pressantes à l'ordre du jour.

Bibliographie

F. Arntzenius (2010). "Reichenbach's Common Cause Principle", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Edition Automne 2010), Edward N. Zalta (dir.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2010/entries/physics-Rpcc/>>.

A. Aspect, J. Dalibard, et G. Roger. (1982). Experimental test of Bell's Inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49: 1804–1807.

A. Aspect. (1983) Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de corrélation de polarisation de photons. Thèse d'Etat, Orsay.

²⁵ Voir l'article de Valia Vallori dans ce volume.

A. Aspect (2002). Bell's theorems: the naive view of an experimentalist. In R. A. Bertlmann and A. Zeilinger (dir.), *Quantum [UN]speakables – From Bell to Quantum Information*. Springer, Berlin Heidelberg New York.

J.S. Bell (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, édition révisée, 2004.

J. Berkovitz (1998). Aspects of quantum non-locality I: Superluminal signaling, action-at-a-distance, non-separability and holism. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 29(2):183–222.

J. Berkovitz (1998). Aspects of quantum non-locality II: Superluminal causation and relativity. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, 29(4):509–45.

J. Butterfield (1992). Bell's theorem: What it takes. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 43(1):41–83.

J. T. Cushing and E. McMullin (dir.) (1989). *Philosophical Consequences of Quantum Theory*. University of Notre Dame Press, Notre Dame.

P. Dowe (2000). *Physical Causation* New York: Cambridge University Press.

J. Earman (1986). Locality, non-locality and action at a distance: A skeptical review of some philosophical dogmas. In P. Achinstein et R. Kargon (dir.), *Theoretical Physics in the 100 Years since Kelvin's Baltimore Lectures*. MIT Press, Cambridge.

A. Einstein, B. Podolsky, B., et N. Rosen (1935): Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review*. 47: 777.

B. Fogel (2007). Formalizing the Separability Condition in Bell's Theorem, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38: 920-37.

R. Healey (2009). Holism and Nonseparability in Physics", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Edition Printemps 2009), Edward N. Zalta (dir.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/physics-holism/>>.

- D. Howard (1985). Einstein on Locality and Separability. *Studies in History and Philosophy of Science*, 16: 171-201.
- D. Hume (1748). *Enquête sur l'entendement humain*. Traduction de Philippe Folliot, http://classiques.uqac.ca/classiques/Hume_david/enquete_entendement_humain/enquete_entendement_hum.html, 2002.
- J. P. Jarrett (1984). On the physical significance of the locality conditions in the Bell arguments. *Noûs*, 18:569–89.
- J. P. Jarrett (1989). Bell's theorem: A guide to the implications. In J. T. Cushing et E. McMullin (1989), 61–79.
- M. R. Jones and R. K. Clifton (1993). Against experimental metaphysics. *Midwest Studies in Philosophy*, XVIII: 295–316.
- Kitcher, P. (1989). Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. In P. Kitcher et W. Salmon (dir), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* Volume XIII. Minneapolis: University of Minnesota Press, 410-505.
- S. Le Bihan (2008). *Understanding Quantum Phenomena*. Thèse de Doctorat, Nancy-Bielefeld. Disponible sur <http://philsci-archive.pitt.edu/4439/>.
- D. Lewis (1973). Causation. *Journal of Philosophy*, 70:556–567.
- D. Lewis (1986). *Philosophical Papers: Volume II*. Oxford: Oxford University Press.
- D. Lewis (2000). Causation as Influence, *Journal of Philosophy*, 97 :182–97.
- T. Maudlin (1994). *Quantum Non-Locality and Relativity, Metaphysical Intimations of Modern Physics*. Blackwell, Oxford.
- W. C. Salmon (1984). *Scientific Explanation and The Causal Structure of the World*. Princeton University Press, Princeton.
- W. C. Salmon (1998). *Causality and Explanation*. Oxford University Press, Oxford.

- A. Shimony (1978). Metaphysical problems in the foundation of quantum mechanics. *International Philosophical Quarterly*, 18:3–17.
- A. Shimony (1981). Critique of the Papers of Fine and Suppes PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. 1980, Volume Two: Symposia and Invited Papers (1980) : 572-580
- A. Shimony (1984). Contextual hidden variables theories and the Bell's inequalities. *British Journal for the Philosophy of Science*, 35(1):25–45.
- A. Shimony (1989). Search for a worldview which can accommodate our knowledge of microphysics. In J. T. Cushing et E. McMullin (1989) : 25–37.
- Shimony, A. (2009) "Bell's Theorem", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Edition été 2009), Edward N. Zalta (ed.), URL = <http://plato.stanford.edu/archives/sum2009/entries/bell-theorem/>.
- P. Suppes and M. Zanotti (1976). On the determinism of hidden variable theories with strict correlations and conditional independence of observables. In P. Suppes et M. Zanotti (dir.), *Foundations of Probability with Applications*, Reidel : 83–91.
- B.C. van Fraassen (1980) *The Scientific Image*. Oxford: Oxford University Press.
- B. C. van Fraassen (1989). The charybdis of realism: epistemological implications of Bell's inequality. In James T. Cushing et Ernan McMullin (1989): 97-113.
- E. Winsberg, and A. Fine (2003). Quantum Life: Interaction, Entanglement and Separation. *Journal of Philosophy*, 100: 80-97.
- J. Woodward (2003). *Making things happen : a theory of causal explanation*. Oxford University Press, Oxford.
- A. Zeilinger (1999). Experiment and the foundations of quantum physics. *Review of Modern Physics*, 71:S288–97.