

3.1

La « mémoire de l'eau »... sans eau

“There is no objective explanation of these observations.”

John Maddox (1988)¹

Description d'une expérience élémentaire

En biologie expérimentale, le but de la plupart des expériences est d'explorer une relation éventuelle entre une cause supposée et un effet biologique. Dans le cadre de la « mémoire de l'eau » nous ne faisons pas d'hypothèses sur les différences physiques des différentes « causes » (hautes dilutions par exemple). En d'autres termes, nous supposons que tous les échantillons qui sont testés dans une expérience sont identiques sur le plan physique et interchangeable. Ces échantillons diffèrent seulement par leur étiquette qui est choisie librement et arbitrairement selon un protocole défini, généralement après une procédure expérimentale. Cette procédure permet d'obtenir des échantillons d'eau qui sont « étiquetés » selon la hauteur de la dilution ou selon l'« imprégnation » qu'ils sont censés avoir reçue par différents moyens. A l'issue d'une telle procédure, deux catégories d'échantillons sont définis: les échantillons « inactifs » et les échantillons « actifs ». Il est important de noter que les termes « inactifs » et « actifs » ne préjugent pas du résultat de l'expérience. Ces termes reflètent simplement les « attentes » de l'expérimentateur.

Un « succès » est alors défini comme 1) l'association de l'étiquette « inactif » (*IN*) avec l'état de « repos » (c'est-à-dire une variation du paramètre biologique qui n'est pas différente du bruit de fond expérimental noté « ↓ ») ou 2) l'association de l'étiquette « actif » (*AC*) avec une variation du paramètre biologique (c'est-à-dire une variation qui dépasse le bruit de fond expérimental) noté « ↑ ». Un « échec » est alors défini comme l'association de *AC* avec « ↓ » ou de *IN* avec « ↑ » (Figure 1). Puisque tous les échantillons sont physiquement

¹ When to believe the unbelievable. *Nature* 1988; 333:787.

identiques, les expériences avec des séries d'échantillons ne sont rien d'autre que des *répétitions des mesures* des paramètres biologiques associés à l'une ou l'autre des deux étiquettes.

Changement biologique (↑)	<i>Echec</i>	<i>Succès</i>
Pas de changement (bruit de fond) (↓)	<i>Succès</i>	<i>Echec</i>
	Etiquette "Inactive"	Etiquette "Active"

Figure 1. Les différentes associations possibles des étiquettes et des états du dispositif expérimental dans la modélisation. Les étiquettes sont soit « inactives » (*IN*) soit « actives » (*AC*) et il y a deux états possibles pour le dispositif expérimental: (1) état de « repos » ou bruit de fond expérimental (« ↓ ») et (2) état « activé » ou changement biologique émergeant du bruit de fond (« ↑ »). Le « succès » est défini comme l'association de *IN* avec « ↓ » et de *AC* avec « ↑ ».

Le but de ces expériences est d'établir si l'état « ↑ » est plus fréquemment associé à l'étiquette *AC* qu'à l'étiquette *IN*, ce qui est formalisé par l'hypothèse nulle (H_0):

$$H_0: \text{Prob}(\uparrow|AC) = \text{Prob}(\uparrow|IN) \quad (\text{Eq. 1})$$

$\text{Prob}(x|y)$ est la probabilité conditionnelle de x étant donné y (ou la probabilité de x sous la condition y).

Les deux piliers de la démonstration

L'expérience est modélisée selon le point de vue d'un observateur P comme nous l'avons défini ci-dessus qui est extérieur au laboratoire. Le rôle de P est de décrire l'évolution d'une *équipe d'observateurs en interaction*. Pour simplifier, nous considérons dans un premier temps deux expérimentateurs O and O' qui observent le système biologique S . L'observateur P (qui pourrait être considéré comme un « méta-observateur ») a une connaissance complète des conditions initiales de O , O' et S . Il est important de souligner à nouveau que P *n'interagit pas* avec les « objets » qu'il décrit et qu'il n'est pas impliqué dans l'évolution de la situation expérimentale.

L'observation de S par O et O' doit être comprise comme un processus en deux étapes. La première étape est l'étape d'*anticipation* qui nécessite un cadre *a priori* sur ce qui est observé. La seconde étape est le *feedback*, c'est-à-dire l'enregistrement du résultat et la prise de connaissance de ce dernier par les observateurs O and O' .

Selon l'interprétation relationnelle, tout événement doit être exprimé relativement à un observateur et différents observateurs ont différents points de vue. En d'autres termes, selon le point de vue de P , les résultats associés à deux observateurs O et O' avant qu'ils interagissent sont *indépendants*. La condition d'indépendance est facilement formalisée puisque les probabilités de deux événements indépendants ont des propriétés mathématiques bien connus :

$$\text{Prob}(A \cap B) = \text{Prob}(A) \times \text{Prob}(B) \quad (\text{Eq. 2})$$

Bien entendu quand O et O' interagissent, ils sont d'accord sur le résultat de l'expérience (accord intersubjectif). L'indépendance des points de vue de O et O' et l'accord intersubjectif sont les deux piliers de la modélisation.

Modélisation d'une expérience avec deux « étiquettes »

Nous supposons une expérience où la probabilité de succès (comme défini ci-dessus) est égale à p et la probabilité d'échec égale à q (avec $p + q = 1$). Dans un premier temps, O et O' n'interagissent pas et la probabilité de succès est p pour O et elle est également p pour O' . La probabilité (du point de vue de P) pour les deux événements indépendants, à savoir l'observation d'un succès par O et O' , est $p \times p$.

Après interaction de O et O' , nous devons tenir du compte du fait que les observateurs sont d'accord sur le résultat. Par conséquent, il existe des situations impossibles telles que O observe un succès tandis que O' observe un échec. (Figure 2). Puisque la somme totale des probabilités de tous les événements possibles doit être égale à un, la probabilité $p \times p$ doit être *renormalisée*. Pour cela, $p \times p$ est divisé par la somme des probabilités de tous les résultats possibles, c'est-à-dire l'observation conjointe d'un succès ($p \times p$) et l'observation conjointe d'un échec ($q \times q$):

$$\text{Prob}(\text{succès}) = \frac{p^2}{p^2 + q^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par p^2 , la seule variable de l'équation est p :

$$\text{Prob}(\text{succès}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{p} - 1\right)^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Les Eq. 3 et Eq. 4 sont facilement généralisées pour tout nombre N d'observateurs:

$$\text{Prob}(\text{succès}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{p} - 1\right)^N} \quad (\text{Eq. 5})$$

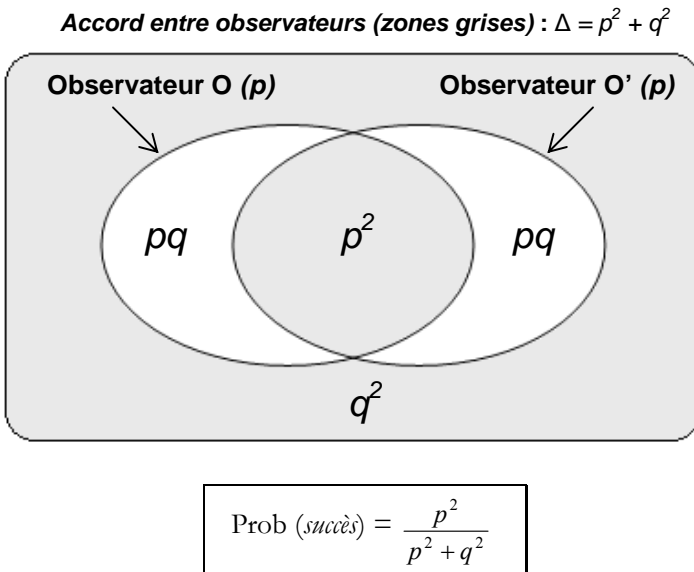


Figure 2. Conséquences de l'indépendance des points de vue des observateurs. Nous supposons que l'événement « succès » est perçu avec une probabilité égale à p et l'événement « échec » avec une probabilité égale à q (avec $p + q = 1$). Bien que les points de vue des deux observateurs soient *indépendants*, ces derniers sont cependant d'accord sur le résultat après leur *interaction*. Les zones blanches correspondent à des situations non permises où les points de vue des observateurs concernant les résultats ne sont pas cohérents (par exemple, « succès » pour l'un et « échec » pour l'autre). Les zones blanches sont par conséquent exclues pour le calcul de la probabilité commune. La probabilité que les deux agents observent un succès est donc calculée par le rapport de la zone centrale grise (succès pour les deux observateurs) divisé par la probabilité d'un résultat (soit succès soit échec) cohérent pour les deux observateurs (ensemble des zones grises).

Dans une expérience réelle, et tout particulièrement en biologie, des fluctuations aléatoires sont inhérentes à toute mesure et nous devons les prendre en compte dans la présente modélisation car un biais est introduit et la probabilité conjointe de succès de O et O' doit être mise à jour après chaque fluctuation élémentaire. Nous allons voir que ce biais, même extrêmement petit, a des conséquences importantes.

Nous calculons maintenant l'évolution de la probabilité pour que O et O' observent un succès (selon le point de vue de P). Tout d'abord, nous écrivons que la probabilité de succès est égale à $1/2$ en absence d'observateurs ($N = 0$ dans l'Eq. 5). Par conséquent, la valeur initiale de la probabilité conjointe pour observer un succès est au temps t_0 avant la première fluctuation égale à $p_0 = 1/2$.

Nous introduisons ensuite ϵ qui est une fluctuation élémentaire aléatoire qui se produit au cours d'un intervalle de temps élémentaire (ϵ est nombre réel aléatoire positif ou négatif tel que $|\epsilon| \ll 1$). Il faut noter qu'une conséquence implicite des fluctuations aléatoires de Prob (succès) est une probabilité non nulle, mais très petite, d'observer une variation du paramètre biologique ("↑").

Après la première fluctuation ϵ_1 , nous calculons facilement la nouvelle probabilité qui est basée sur $p_0 = 1/2$. L'équation est ensuite généralisée pour toute probabilité $n+1$ basée sur la probabilité précédente n et la fluctuation $n+1$. Nous obtenons une suite mathématique qui permet de calculer les probabilités successives de succès:

$$\text{Prob}_{n+1}(\text{succès}) = p_{n+1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{p_n + \epsilon_{n+1}} - 1 \right)^N} \quad \text{avec } p_0 = 1/2 \quad (\text{Eq. 6})$$

Deux « étiquettes » associées à des résultats différents

L'Eq. 6 permet de calculer les états successifs d'un système constitué d'un système biologique et d'une équipe d'expérimentateurs/observateurs en interaction engagée dans la mise en évidence d'une relation causale entre « étiquettes » et états d'un système biologique. Le système dans son ensemble est soumis à de petites fluctuations aléatoires et est décrit du point de vue d'un participant P qui n'est pas impliqué dans l'expérience.

Le résultat du calcul à l'aide d'un tableur de cette suite mathématique est décrit Figure 4 après 100 fluctuations aléatoires ϵ successives (avec des valeurs de l'ordre de 10^{-15}) et avec deux observateurs ($N = 2$ dans l'équation 6). Nous

observons que la situation initiale est en fait *métastable* lorsque les fluctuations sont prises en compte. En effet, dans tous les cas (i.e. quelles que soient les valeurs successives ϵ_i), une transition brutale en direction l'une des deux positions stables est obtenue :

$$\begin{aligned} \text{Prob (succès)} &= 1/2 \text{ (position métastable)} \\ &\downarrow \\ \text{Prob (succès)} &= 1 \text{ ou } 0 \text{ (deux positions stables possibles)} \end{aligned} \tag{Eq. 7}$$

Selon le hasard, une expérience est donc soit un succès pour l'ensemble des échantillons, soit un échec pour l'ensemble des échantillons. Il faut souligner que la probabilité d'un changement biologique (« \uparrow ») est seulement ϵ au temps t_0 et est associé à tous les échantillons avec l'étiquette *AC* dans la position stable n°1 et tous les échantillons avec l'étiquette *IN* dans la position stable n°2. Dans les deux cas (succès ou échec), une relation entre les étiquettes et les états du dispositif biologique émerge.

Toutefois le but d'une expérience est de comparer une situation « test » à une situation contrôle. Les systèmes biologiques sont préparés par conséquent dans un état asymétrique avec l'état de repos (bruit de fond) qui est implicitement associé à un « contrôle ». En d'autres termes, l'état de repos (état de base) du dispositif biologique avant le « test » d'un échantillon peut être considéré comme un résultat associé à l'étiquette « contrôle » (l'expérience commence avec la préparation du système biologique avant le test des échantillons).

Nous supposons que l'étiquette *IN* est considérée comme un « contrôle » par les expérimentateurs. Par conséquent, l'état stable n°2 s'élimine de lui-même puisque *IN* ne peut pas être associée dans une même expérience à la fois avec « \uparrow » pour les échantillons marqués *IN* et avec « \downarrow » pour l'état stable. Seule la position stable n°1 est un état possible:

$$\begin{aligned} \text{Prob (succès)} &= 1/2 \text{ (position métastable)} \\ &\downarrow \\ \text{Prob (succès)} &= 1 \text{ (position stable)} \end{aligned} \tag{Eq. 8}$$

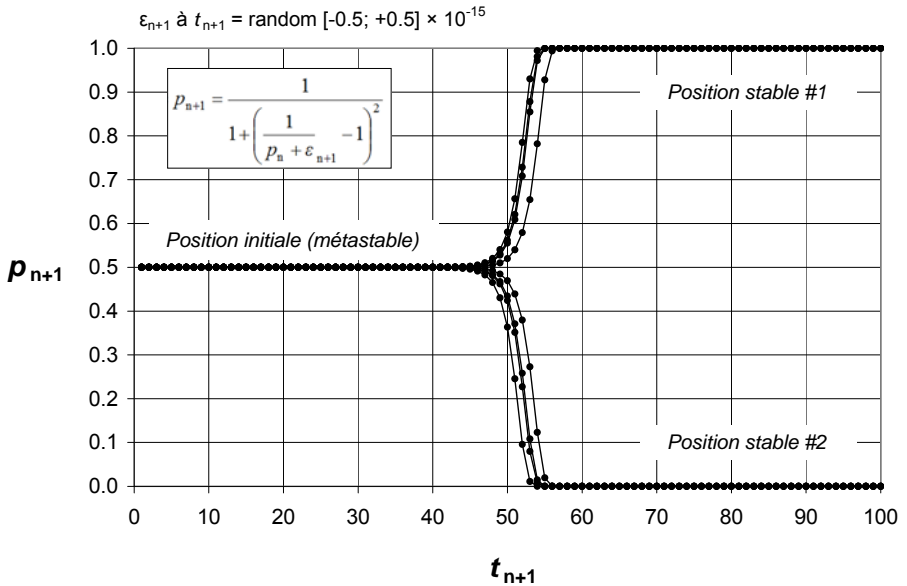


Figure 3. Calcul de la probabilité de succès. L'évolution de la probabilité qu'une équipe (composée de deux observateurs en interaction) observe un succès est décrite sur cette figure en prenant en compte des fluctuations aléatoires successives. La probabilité définie Figure 2 est calculée selon la suite mathématique du cartouche. Chaque probabilité p_{n+1} de la suite est calculée à partir de p_n et de la fluctuation aléatoire ε_{n+1} . Au temps t_0 , p_0 est égale à $1/2$. Les fluctuations ε_{n+1} à chaque étape (c'est-à-dire à chaque temps t_{n+1}) sont obtenues au hasard dans l'intervalle -0.5 à $+0.5 \times 10^{-15}$. Cette simulation numérique montre que l'état initial avec une probabilité de $1/2$ est en fait métastable et, après une transition brutale, l'une des deux positions stables est atteinte: soit $\text{Prob}(\text{succès}) = 1$ ou $\text{Prob}(\text{succès}) = 0$. Avec $N > 2$ ou avec des fluctuations de probabilités plus élevées, une transition est obtenue après un nombre d'étapes de calcul plus petit (résultats non montrés). La figure représente huit simulations numériques.

Les corrélations entre étiquettes et états du dispositif biologique dépendent des conditions expérimentales

Jusqu'à présent nous avons considéré une situation expérimentale où les observateurs O et O' évaluaient eux-mêmes les corrélations entre étiquettes et effets biologiques (expériences en ouvert). Néanmoins, les étiquettes peuvent être masquées de façon à réduire ou éliminer tout biais. Une fois que tous les résultats ont été obtenus dans les conditions à l'aveugle, les étiquettes des échantillons sont démasquées. Pour le présent formalisme, nous allons

distinguer deux types d'expériences à l'aveugle selon que l'évaluation des corrélations a lieu localement ou à distance.

Afin de réaliser une évaluation locale des corrélations d'une expérience à l'aveugle, un dispositif automatique ou un observateur maintiennent le secret sur les étiquettes des échantillons qui sont testées sous des numéros de code (*expériences avec Bob du chapitre 1.7*). Dans ce cas, le dispositif automatique ou l'observateur dédié (superviseur local) font partie de l'expérience car ils interagissent avec les autres observateurs et peuvent être décrits avec la même modélisation que pour les expériences en ouvert.

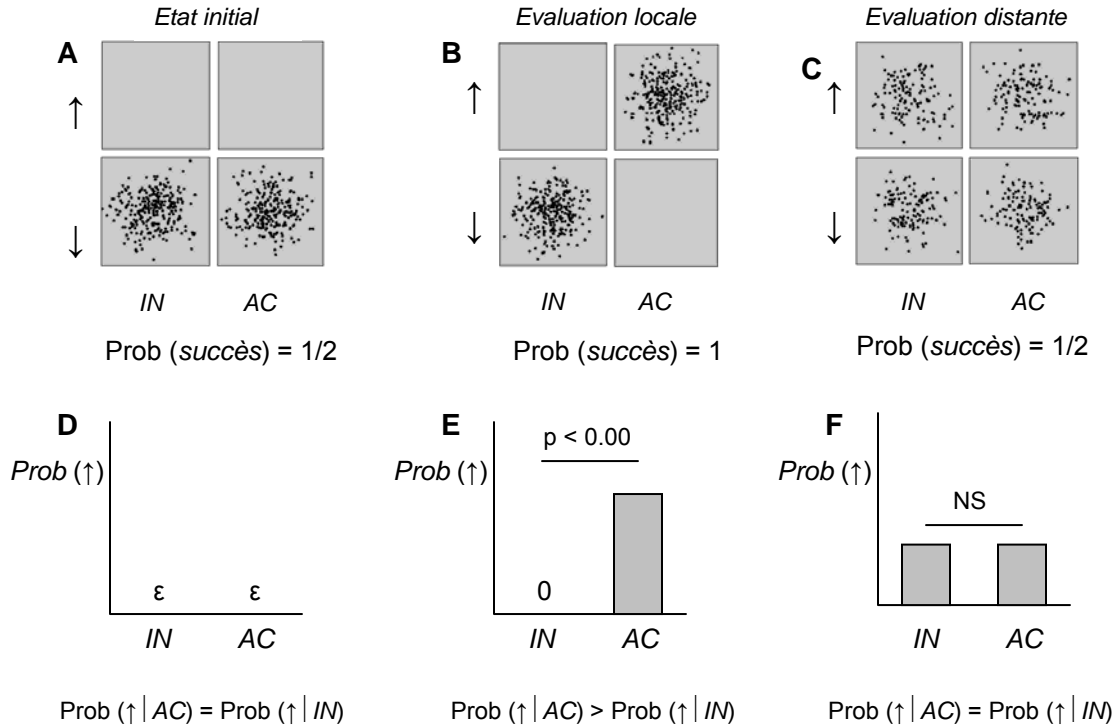
L'évaluation à distance des corrélations d'une expérience à l'aveugle est utilisée au cours des essais cliniques randomisés (*expériences avec Eve du chapitre 1.7*). Le superviseur distant (un statisticien par exemple) n'interagit pas avec les expérimentateurs/observateurs avant que toutes les mesures soient réalisées. Il est important de souligner que le superviseur distant ne doit pas être confondu avec le participant non impliqué P qui décrit l'expérience. En effet, ce dernier ne connaît pas les étiquettes et les résultats biologiques associés.

Avec un superviseur distant, les observateurs/expérimentateurs observent le résultat biologique de chaque échantillon, mais n'ont pas d'information sur les étiquettes. Pour chaque échantillon, $\text{Prob}(\text{succès}) = \text{Prob}(\text{échec})$. Puisque $\text{Prob}(\text{succès}) + \text{Prob}(\text{échec}) = 1$, alors $\text{Prob}(\text{succès}) = 1/2$ quelle que soit l'étiquette. Par conséquent, il existe une transition de la position métastable en direction de l'une des deux positions stables, mais au hasard. En résumé :

- $\text{Prob}(\text{succès}) = 1$ avec une évaluation locale des corrélations;
- $\text{Prob}(\text{succès}) = 1/2$ avec une évaluation à distance des corrélations.

La **Figure 4** illustre les conséquences d'une évaluation des corrélations avec une évaluation à distance (expérience à l'aveugle avec un superviseur distant). Il n'y a pas de différence statistique pour les résultats biologiques associés à IN et AC au contraire d'une évaluation locale (aveugle local ou expérience en ouvert). En effet, les changements biologiques associés aux deux placebos sont comparables. L'hypothèse nulle de l'Eq. 1 est donc confirmée dans le cas d'une évaluation à distance.

Figure 4. Comparaison des évaluations locales vs. distantes dans une expériences comparant deux étiquettes (*IN* et *AC*).



Le contexte expérimental est par conséquent crucial pour l'établissement d'une relation. Avec une évaluation locale, les expérimentateurs observent l'étiquette puis l'état du dispositif biologique (expérience en ouvert) ou observent l'état du dispositif biologique puis l'étiquette (expérience avec aveugle local). Au contraire, avec un superviseur distant, les expérimentateurs observent l'état du dispositif biologique, mais *n'ont pas de feedback* sur l'étiquette. Si un observateur/expérimentateur local est *le premier* à évaluer la relation, des corrélations émergent; si un superviseur distant est *le premier* à évaluer la relation, ils disparaissent (des changements biologiques sont néanmoins observés mais pas aux bonnes places). Bien évidemment, quand les participants se rencontrent, ils sont d'accord sur les conclusions (corrélation ou non). *L'ordre des évaluations* (local d'abord ou à distance d'abord) est l'élément clé du degré de corrélations.

On peut noter que la différence entre l'évaluation locale et l'évaluation à distance des corrélations offre une possibilité de tester la modélisation. Nous aurons l'occasion de reparler de ce point

Caractérisation du rôle des observateurs O et O'

Puisque les observateurs O et O' semblent jouer un rôle crucial dans la modélisation, nous allons examiner dans cette partie comment ce rôle peut être caractérisé et quantifié.

La modélisation nécessite d'exprimer la survenue d'un événement relativement à chaque observateur O et O' . Nous avons vu dans l'Eq. 2 que la probabilité de survenue simultanée de deux événements indépendants A et B est égale au produit de la survenue des deux événements séparément. Cette équation peut être généralisée pour deux événements A et B en fonction de leur degré d'indépendance :

$$\text{Prob}(A \cap B) = \text{Prob}(A) \times \text{Prob}(B) + d \quad (\text{avec } 0 \leq d \leq 1) \quad (\text{Eq. 9})$$

Les deux événements sont indépendants pour $d = 0$ et le degré d'indépendance diminue avec la valeur de d . En d'autres termes, la corrélation entre les deux événements augmente quand la valeur de d augmente. L'Eq. 3 qui décrit la probabilité conjointe de succès peut être facilement modifiée si d est pris en compte (Figure 5 ; voir la légende de la figure pour les détails de calcul) :

$$\text{Prob}(\text{succès}) = \frac{p^2 + d}{p^2 + q^2 + 2d} \quad (\text{avec } 0 \leq d \leq 1/4) \quad (\text{Eq. 10})$$

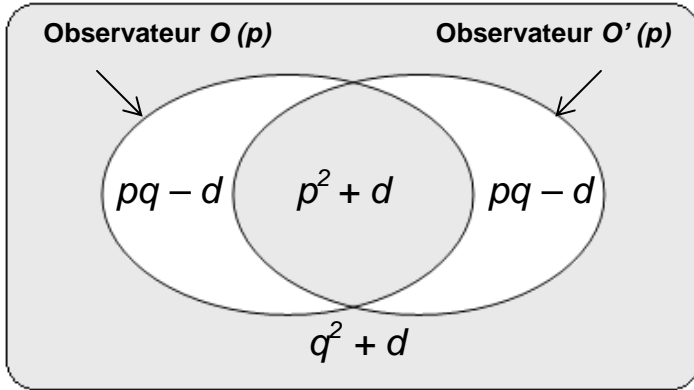
Quand le paramètre d varie de $d = pq = 1/4$ à $d = 0$, la situation expérimentale se déplace progressivement d'une situation classique (événements exprimés relativement au système observé) à une interprétation relationnelle (événements exprimés relativement à chaque observateur) (Figure 5).

Le fait de distinguer deux types d'échantillons qui reçoivent deux étiquettes distinctes (*IN* et *AC*) est totalement arbitraire (souvenons-nous que tous les échantillons sont inertes et physiquement identiques). Le choix de l'étiquette pour un échantillon donné est la conséquence d'un libre choix de la part des expérimentateurs. Comme nous l'avons vu ci-dessus, un protocole (décrivant ce que l'on pourrait appeler un « rituel ») peut être utilisé de façon à définir quels échantillons sont considérés comme *IN* et lesquels comme *AC*.

Dans la modélisation, en dépit de l'identité physique des échantillons étiquetés *IN* ou *AC*, des résultats différents sont observés avec tous les échantillons *AC* associés à un changement biologique (“↑”) et tous les échantillons *IN* associés à une absence de changement (“↓”).

« Observer » une expérience exige un cadre de référence (qu'attendons-nous ?) et un feedback (qu'avons-nous obtenu ?). L'Eq. 6 indique qu'il n'y a pas de transition de Prob(*succès*) en direction d'une position stable *en absence d'observateurs* ($N = 0$). Du fait de la nature subjective du critère expérimental évalué (relation), nous pouvons conclure de la même façon si les observateurs sont physiquement présents dans le laboratoire mais ne focalisent pas spécifiquement leur attention sur cette expérience (ils n'en attendent rien et n'en reçoivent aucun feedback). Par conséquent, le paramètre d peut être considéré comme une évaluation de l'attention de l'équipe d'expérimentateurs pour observer la relation prédéfinie entre étiquettes et états du dispositif biologique. Quand $d = 0$, les observateurs sont complètement engagés dans cette observation et pour $d = pq$ leur attention en est complètement détournée. Pour les valeurs intermédiaires, l'équipe est plus ou moins occupée avec ces observations. Par conséquent, les qualités des expérimentateurs, telles que l'attention, l'engagement ou la persévérance apparaissent nécessaires pour que des corrélations émergent entre étiquettes et états du dispositif biologique.

Accord entre observateurs (zones grises) : $\Delta = p^2 + q^2 + 2d$



$d = pq$

$d = 0$

$$\text{Prob (succès)} = \frac{p^2 + pq}{p^2 + q^2 + 2pq} = p$$

$$\text{Prob (succès)} = \frac{p^2}{p^2 + q^2}$$

Interprétation classique

(Événements exprimés relativement au système observé)

Interprétation relationnelle

(Événements exprimés relativement à chaque observateur)

Figure 5. De l'interprétation classique à l'interprétation relationnelle. La situation expérimentale décrite Figure 2 est généralisée ici par l'introduction du paramètre d qui varie selon le degré de dépendance des observations de O et O' (avant interaction). Les valeurs des deux aires avec des situations impossibles (succès pour l'un des observateurs et échec pour l'autre) sont calculées: $p - (p^2 + d) = p \times (1 - p) - d = pq - d$. Pour $d = 0$, des corrélations émergent entre étiquettes et états du dispositif biologique et, pour $d = pq$, la probabilité de succès est égale à p comme pour les probabilités classiques.

Emergence de corrélations « quantum-like »

Dans cette modélisation, seuls les outils des probabilités classiques sont utilisés. Néanmoins, comme nous allons le démontrer, une logique de type quantique opère. Cette dernière prend ses racines dans la partition arbitraire qui est faite initialement en distinguant les étiquettes IN et AC . La première étape de la démonstration est la mise au carré de $\text{Prob}(IN) + \text{Prob}(AC) = 1$:

$$\begin{aligned} [\text{Prob}(IN) + \text{Prob}(AC)]^2 &= \\ [\text{Prob}(IN)]^2 + [\text{Prob}(AC)]^2 + 2 \times \text{Prob}(IN) \times \text{Prob}(AC) &= 1 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 11})$$

Nous définissons ensuite a et b tels que $\text{Prob}(IN) = a^2$ (ou $a.a$) et $\text{Prob}(AC) = b^2$ (ou $b.b$). Ces définitions correspondent à la position stable n°1 (pour la position stable n° 2, b^2 doit être pris égal à $-b \times -b$):

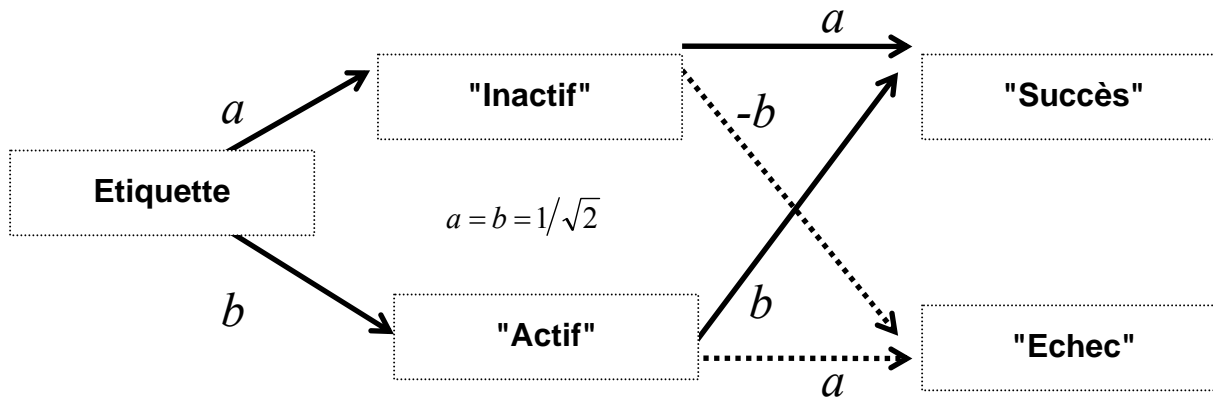
$$[a \cdot a + b \cdot b]^2 = (a \cdot a)^2 + (b \cdot b)^2 + 2 \times (a \cdot b)^2 = 1 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$[a \cdot a + b \cdot b]^2 + [b \cdot a - a \cdot b]^2 = (a \cdot a)^2 + (b \cdot b)^2 + (b \cdot a)^2 + (a \cdot b)^2 = 1 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$1 \quad + \quad 0 \quad = \quad 1/2 \quad + \quad 1/2 \quad = 1 \quad (\text{Eq. 14})$$

Par conséquent, la partition initiale des étiquettes a pour conséquence l'obtention d'autres états possibles de la situation expérimentale. Comme le montre la Figure 7, le bras gauche de l'Eq. 13 est la somme de $\text{Prob}(\text{succès})$ plus $\text{Prob}(\text{échec})$ en absence d'un superviseur distant et le bras droit est a somme de $\text{Prob}(\text{succès})$ plus $\text{Prob}(\text{échec})$ avec un superviseur distant. Les termes a et b sont donc des *amplitudes de probabilité* et leur carré permet de calculer les probabilités correspondantes.

Comme on peut le voir Figure 6, la probabilité d'une relation sans superviseur distant est calculée en faisant la somme des amplitudes de probabilité des deux chemins qui conduisent au succès puis en calculant le carré de cette somme. Avec un superviseur distant, la probabilité de succès est calculée en mettant au carré les amplitudes de probabilité de chaque chemin qui conduit au succès puis en faisant la somme des probabilités des deux chemins.



Carré de la somme des amplitudes de probabilité des chemins
(sans superviseur distant) :

$$\text{Prob}(\text{succès}) = (a \times a + b \times b)^2 = 1$$

$$\text{Prob}(\text{échec}) = (b \times a - a \times b)^2 = 0$$

Somme des carrés des amplitudes de probabilité des chemins
(avec superviseur distant) :

$$\text{Prob}(\text{succès}) = (a \times a)^2 + (b \times b)^2 = 1/2$$

$$\text{Prob}(\text{échec}) = (b \times a)^2 + (a \times b)^2 = 1/2$$

Figure 7. Probabilités classiques et *quantum-like* pour l'événement « succès ». Les probabilités de « succès » sont différentes selon les probabilités classiques ou les probabilités *quantum-like*. En effet, les probabilités *quantum-like* sont calculées comme le carré de la somme des amplitudes de probabilité des différents « chemins » possibles. Les probabilités classiques sont calculées comme la somme des carrés des amplitudes de probabilité des « chemins ».

La modélisation a la même logique que l'auto-interférence d'un photon unique dans l'expérience des deux fentes de Young où les photons se comportent comme des particules lorsque leurs chemins sont détectés ou comme des ondes lorsqu'ils ne le sont pas. Dans la Figure 7 qui décrit une expérience élémentaire, des corrélations « quantum-like » sont observées quand les « chemins » (c'est-à-dire les étiquettes) sont indiscernables (d'un point de vue externe) et les corrélations disparaissent quand ils sont discernables par un superviseur distant car dans ce cas les probabilités classiques s'appliquent.

L'émergence des corrélations « quantum-like » est la conséquence des deux principes initiaux, à savoir l'indépendance des points de vue de O et O' et l'accord intersubjectif. La prise en considération concomitante de ces deux principes implique que la « réalité commune » de O and O' ne préexiste pas à leur interaction (selon le point de vue de P). C'est une caractéristique des mesures quantiques et, dans le contexte de l'interprétation relationnelle, les corrélations sont la seule « réalité ». Dans le langage de la physique quantique, l'« état » de O est dit « superposé » avant l'interaction avec O' (et vice versa). L'accord intersubjectif joue le même rôle qu'une *loi de conservation* en physique et O et O' sont dits « intriqués » après interaction.

Importance d'un point de vue non engagé

La construction de la modélisation selon le point de vue de P est centrale dans le raisonnement. En effet, du point de vue de O , s'il observe un succès ou un échec, alors on peut être sûr que O' lui confirmera qu'il observe le même événement. Par conséquent, la probabilité conjointe de O et O' est p dans ce cas, en conformité avec les probabilités classiques, et non pas $p \times p$ (avant renormalisation) selon le point de vue de P . Les points de vue de P et $O-O'$ coïncident dans les situations où ces deux équations sont vérifiées:

$$p = \frac{p^2}{p^2 + q^2} \quad \text{et} \quad q = \frac{q^2}{p^2 + q^2} \quad (\text{Eq. 15})$$

Les deux équations sont équivalentes respectivement à :

$$(2p - 1)(p - 1) = 0 \quad \text{et} \quad (2q - 1)(q - 1) = 0.$$

Par conséquent, il y a seulement trois valeurs possibles pour p : $1/2$, 1 or 0 . Ce sont les probabilités associées respectivement à : position initiale, position stable n°1 et position stable n°2. Seul le point de vue distant de P qui *n'est pas impliqué* dans l'observation de l'expérience permet de décrire la transition de Prob (succès) de $1/2$ vers 1 (or 0) comme conséquence de l'émergence d'« interférences quantum-like » (c'est-à-dire les termes croisés avec les amplitudes de probabilité égales à b et $-b$ dans la Figure 7).

Les différences entre les points de vue de O - O' et P sont la conséquence de la démonstration de Breuer sur l'impossibilité d'une automesure complète. Selon cette démonstration, un appareil de mesure (ou un observateur) est incapable de discerner tous les états d'un système dans lequel il est contenu (que ce système soit classique ou quantique).^{1,2} Seul un second appareil externe (P) qui mesure à la fois le premier appareil (O) et le système (S) est capable de mesurer toutes les corrélations entre O et S .



¹ Breuer T. The Impossibility of Accurate State Self-Measurements. *Philos Sci* 1995; 62: 197-214.

² Laudisa F, Rovelli C. "Relational Quantum Mechanics", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2013 Edition), Zalta EN (ed.).

<http://plato.stanford.edu/archives/sum2013/entries/qm-relational/>.