

## 2.9

---

### *Probabilités classiques, probabilités quantiques*

*« Mais étaient-elles possibles ces possibilités qui ne le furent pas ? Ou la seule possibilité était-elle ce qui fut ? »*

James Joyce. *Ulysse* (1929)

*« La vie est faite d'illusions. Parmi ces illusions, certaines réussissent. Ce sont elles qui constituent la réalité ».*

Jacques Audiberti. *L'effet Glapion* (1959)

#### *D'où viennent les probabilités ?*

L'interprétation du statut des probabilités en physique quantique est un point important car elle nous fait toucher du doigt les fondements de la théorie quantique et son étrangeté.

Ainsi, dans le monde classique, les probabilités s'additionnent. Supposons que  $P_1$  et  $P_2$  soient les probabilités correspondant au jet d'une pièce de monnaie. Nous pouvons écrire que la probabilité d'observer les deux événements  $E_1$  (pile) ou  $E_2$  (face) est :

$$P(E_1 \text{ ou } E_2) = P_1 + P_2$$

En physique quantique, on écrit que  $P_1 = a^2$  et  $P_2 = b^2$ , avec  $a$  et  $b$  deux nombres complexes appelés « amplitudes de probabilité » dont les carrés permettent de calculer les probabilités correspondantes. Le point important est que, contrairement à la physique classique, *ce ne sont pas les probabilités qui s'additionnent mais les amplitudes de probabilité* :

$$P(E1 \text{ ou } E2) = (a + b)^2 = P1 + P2 + \text{un terme complexe « d'interférence »}^1$$

Par conséquent, il existe en physique quantique un *terme supplémentaire*. Nous avons vu en particulier que les probabilités quantiques pouvaient *interférer*, ce qui n'est pas le cas des probabilités classiques. Une conséquence du terme d'interférence, comme nous l'avons vu, est que des événements qui auraient pu survenir mais *ne se sont pas produits* jouent néanmoins un rôle (contrafactuel).

Rappelons également quelques notions déjà abordées. La physique classique modélise et prédit des événements dont la succession se déroule selon des lois déterministes. Contrairement à ce qui est parfois dit, la physique quantique n'est pas non déterministe. En effet, l'équation de Schrödinger est soumise à un déterminisme strict. Toutefois son déterminisme a pour objet non pas les événements eux-mêmes, mais leur *probabilité de survenue*. Le déterminisme est donc en arrière-plan et, puisque les événements que nous observons dans notre branche d'univers sont aléatoires, cela conduit à parler – faussement – de l'indéterminisme de la physique quantique. Nous devons donc perdre l'habitude de considérer notre monde comme un univers d'objets mais plutôt comme un *univers de possibilités*. Et c'est pour cette raison que la physique quantique est parfois nommée « la physique des possibles ».

Plaçons-nous tout d'abord dans un cadre classique et prenons l'exemple de deux expérimentateurs. Le premier lance une pièce de monnaie et prend connaissance du résultat (pile) sans en informer le deuxième expérimentateur à qui il demande de parier sur le résultat. Ce dernier estime que la pièce non biaisée a eu 50% de chances de tomber sur pile et 50% de tomber sur face. S'il pouvait connaître avec une extrême précision l'ensemble des paramètres physiques qui influencent la trajectoire de la pièce, tels que les paramètres initiaux de position et de vitesse, le mouvement des molécules d'air, les irrégularités de la surface recevant la pièce, etc., alors le calcul lui permettrait d'estimer que la pièce avait 100% de chance de tomber sur pile. Nous sommes donc passés de 50% à 100% de chance pour pile. D'ailleurs le lanceur de la pièce connaît, lui, le résultat avec 100% de chance que ce soit pile. Et lorsque le deuxième expérimentateur prend enfin connaissance du résultat, c'est pile avec 100% de chance. Par conséquent, pour la physique classique, les probabilités évaluent l'ignorance d'un observateur donné.

---

<sup>1</sup> Pour les mathématiciens :  $P(E1 \text{ ou } E2) = a^2 + b^2 + ab^* + a^*b$  avec  $a^2 = P1$  et  $b^2 = P2$  (\* désigne le nombre conjugué correspondant aux nombres complexes  $a$  et  $b$ ).

Envisageons maintenant le cas quantique et prenons une fois de plus l'inépuisable exemple du chat de Schrödinger. Nous nous souvenons que sa vie est suspendue à l'éventuelle désintégration d'un atome radioactif. Comme nous l'avons déjà vu, notre incapacité à dire si à l'issue de l'expérience le chat est mort ou vivant, n'est pas liée à un manque de moyens qui permettrait de mettre en évidence d'éventuelles « variables cachées » mais est constitutif de la théorie quantique.

Il existe toutefois une différence d'interprétation selon les partisans de l'Ecole de Copenhague et les tenants du multivers. Pour les partisans de l'Ecole de Copenhague, les probabilités doivent s'interpréter comme la fréquence relative des différents états possibles *si on répétait la même expérience*. Les états des différents chats utilisés dans les *expériences successives ou simultanées* peuvent s'écrire :

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{M} \text{ (avec } \alpha^2 = \beta^2 = 0,5 ; \mathbf{M} = \text{état mort} ; \mathbf{V} = \text{état vivant)}$$

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V}$$

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V}$$

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{M}, \text{ etc.}$$

Pour chaque expérience il y a « réduction de la fonction d'onde » et une seule des branches est « réalisée ». On trouve bien en répétant les expériences que la probabilité que le chat soit vivant à la fin de l'expérience est 0,5.

Pour ceux qui défendent l'idée du multivers, l'équation de Schrödinger doit être prise « au pied de la lettre ». En particulier, les probabilités n'ont pas à être justifiées car elles sont *directement inscrites* dans l'équation de Schrödinger (ce sont les carrés des amplitudes de probabilité des différents états possibles) :

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \text{ (avec } \alpha^2 = \beta^2 = 0,5)$$

Selon cette interprétation les états  $\mathbf{M}$  et  $\mathbf{V}$  sont tous deux réalisés mais cette expérience (qui restera unique) fera toujours partie du passé de différents observateurs au cours des innombrables divisions successives de leurs branches d'univers. La probabilité se définit alors comme la fréquence relative des différentes branches où un état donné a été observé. Par conséquent, il est inutile d'imaginer une éventuelle répétition des expériences. De plus, il est inutile de faire appel à une hypothétique « réduction de la fonction d'onde ». Comme le souligne L. Susskind : « *L'effondrement de la fonction d'onde est une facilité, un habile subterfuge* » (cf. l'encadré en fin de chapitre).

En résumé, en physique classique, les probabilités sont *subjectives*. Le monde étant totalement déterministe, la connaissance des conditions initiales permet de

prédire avec certitude son évolution. Dans ce cadre, les probabilités ne font que refléter la connaissance plus ou moins complète que possède un observateur sur cette évolution et cette connaissance varie selon l'observateur. En physique quantique, les probabilités sont *objectives* car elles sont constitutives de la « réalité » et elles sont identiques pour tous les observateurs.

*Platon vs. Aristote : la réconciliation ?*

Retrouvons à nouveau notre fermier bien connu. Toujours passionné par la logique quantique, il s'est attelé à une nouvelle tâche. Nous le surprenons en train de fixer un panneau de bois au dessus de la porte d'entrée d'un poulailler. On peut y lire l'épigraphe suivante :

« LA GRAMMAIRE DES CHEMINS POSSIBLES :

*Explorant tous les possibles,*

*La Nature va de ET en ET.*

*N'empruntant qu'un chemin possible,*

*L'observateur avance de OU en OU. »*

Le fermier est maintenant bien convaincu que, concernant les particules de la physique – par exemple le photon des fentes de Young – la Nature explore tous les chemins possibles. Mais pour les objets macroscopiques, son bon sens rechigne à l'admettre.

Ses expériences précédentes lui ont néanmoins appris à se méfier du sens commun. Il a donc décidé d'expérimenter dans ce domaine.

Ainsi il a remarqué que lorsqu'il s'approchait de ce poulailler chaque matin, les poules s'agitaient avec frénésie et, lorsqu'il entrouvrait la porte, une poule s'échappait – au hasard – qu'il rattrapait de justesse.

Il décide de mettre à profit ce générateur aléatoire.<sup>1</sup> Le fermier en effet a compris que les probabilités jouaient un rôle important dans la logique quantique. Et il se pose maintenant des questions sur l'origine des lois statistiques.

---

<sup>1</sup> Nous supposons que la probabilité de s'échapper est la même pour chaque poule et que les poules ne communiquent pas entre elles pour décider de l'ordre de sortie (chaque tirage est indépendant).

Dans un premier temps, il place une poule noire et une poule blanche dans le poulailler et chaque matin il note la couleur de la première poule qui sort lorsqu'il ouvre la porte. Il note le résultat de ses observations en les gravant dans le bois de la porte du poulailler. Ainsi, après dix jours d'observations, il obtient la séquence suivante : **NNBNBNNBBN**.

Sans se lasser, il répète l'expérience des centaines et des centaines de fois. Puis il réalise d'autres expériences où il ajoute une, deux ou trois poules blanches.

Il observe que plus le nombre de tirages est important et plus le nombre de succès, par exemple la sortie d'une poule noire, se rapproche de la fréquence des poules noires dans le poulailler. Ainsi, s'il y a trois poules blanches et une poule noire, il obtient le résultat suivant après cinquante essais :

**BNBBBBBNBBNBBBBBBBNBNNBBBBNBBNBBBNNBBN**

Plus le nombre d'essais augmente, plus le rapport N/B se rapproche de 1/4.

Le fermier comprend bien entendu pourquoi il a obtenu ce résultat ; il a appris en effet par ses lectures ce qu'est loi des grands nombres. Néanmoins il n'est pas totalement satisfait. Son intuition lui souffle que si les tirages sont indépendants – et ils le sont – il est remarquable que la somme de résultats individuels supposés indépendants reflète la répartition des couleurs des poules. Chaque poule est probablement persuadée qu'elle ne doit qu'à sa débrouillardise de pouvoir se frayer un chemin vers la sortie. Et pourtant le résultat final semble montrer qu'elle est soumise à une loi qui la dépasse.

Et c'est bien ce qui tracasse le fermier, cet apparent dialogue entre chaque résultat individuel et la répartition des couleurs des poules. *Qui* décide alors de la couleur de la poule qui s'échappe ? se demande le fermier. C'est bien beau de dire que c'est « le hasard », poursuit-il, mais il faut bien que quelque part une décision soit prise pour *chacun* des résultats individuels pour qu'à la fin la bonne distribution soit observée ?

Il reprend ses expérimentations avec une poule blanche et une poule noire dans le poulailler. Dès que la poule est sortie, il l'arrête dans sa course comme d'habitude ; puis il s'assied pour réfléchir.

*Si je répète les tirages*, se dit le fermier, j'observerai un nombre de sorties de poules noires qui, rapporté au nombre total de sorties, sera une estimation de la fréquence des poules noires dans le poulailler. Il est possible toutefois que je ne poursuive pas l'expérience au-delà du premier tirage. Quel est alors le statut de

la probabilité de cette unique expérience ? Est-il licite de prendre en compte d'hypothétiques événements dans le futur qui peut-être n'auront jamais lieu ?

Insatisfait, il se replonge dans ses ruminations. Voyons se dit-il, une poule est sortie. Elle est blanche, mais après tout, peu importe sa couleur. Elle *aurait pu* être noire...

Pendant plusieurs minutes il répète ce leitmotiv – elle *aurait pu* être noire – qui semble lui évoquer quelques souvenirs. Machinalement son regard se porte sur le panneau qu'il a fixé au dessus de la porte : « *La Nature va de ET en ET* ». Mais oui, c'est bien cela, s'exclame-t-il, la Nature explore *tous* les chemins possibles, même si moi je n'ai qu'une seule poule dans les mains à chaque fois.

En fait, se dit-il, il est vain de se demander *qui* décide la sortie de telle ou telle poule puisque la Nature explore *tous* les chemins possibles. Par conséquent *toutes* les poules sortent du poulailler et j'arrête chacune d'elles dans sa course. Pourquoi j'ai le sentiment d'être sur un chemin et pas sur un autre reste néanmoins un mystère. Mais peut-être est-ce un faux problème en rapport avec l'idée que je me fais de mon « moi » personnel. J'ai néanmoins fait un grand pas aujourd'hui. J'ai compris que chaque événement individuel était le reflet – *pour chacun de mes « moi »* – de l'ensemble des chemins explorés ! Pour calculer la probabilité de cet événement individuel, on doit tenir compte de *l'ensemble des chemins explorés*.

Le fermier finit par cerner l'interrogation qui troublait son entendement. Il la formule en ces termes : les lois statistiques sont-elles responsables de la réalisation des événements individuels (les idées donnent une forme au monde, à ses réalisations individuelles) ou au contraire les événements individuels sont-ils la source des lois ? Dans ce dernier cas, les lois ne seraient qu'un moyen commode pour résumer l'ensemble des résultats individuels possibles.

Rentré chez lui, il se plonge dans des livres de philosophie. Il apprend ainsi que pour Platon, l'idée prime sur le phénomène. Seul l'universel, les lois générales, les mathématiques « existent ». Les événements individuels ne sont que des « projections » du monde des idées. Platon est un *idéaliste*.

Pour Aristote, au contraire, le *phénomène* est premier et l'idée n'existe pas en soi, elle est créée par l'homme. Le philosophe s'intéresse d'abord à ce qu'il perçoit avant d'en tirer des lois plus générales. C'est par la connaissance de nombreux phénomènes individuels que l'on parvient à des lois générales. Aristote est un *réaliste*.

Dans un livre d'art, le fermier admire une reproduction d'un célèbre tableau de Raphaël intitulé *L'École d'Athènes*. On y voit Platon et Aristote côte à côte. Dans un raccourci saisissant, leurs postures résument toute leur philosophie.

L'index de Platon désigne le ciel, royaume des idées, tandis que la main d'Aristote désigne le monde ici-bas, celui de la réalité sensible.

Le fermier s'imagine discutant avec les deux philosophes. Comment ces derniers rendraient-ils compte de l'expérience de tirage aléatoire avec les poules ?

Pour Platon, les poules noires sont, par exemple, dans le rapport NBBB avec l'ensemble des poules ; c'est à dire un rapport 1/4. Le rapport 1/4 est du domaine mathématique. C'est un être abstrait, idéal. Par conséquent, Platon utiliserait volontiers le *premier principe* : « *La Nature explore tous les chemins possibles* ». Le plus souvent les lois physiques ou mathématiques ne sont pas comme ici un catalogue des résultats possibles (les chemins NBBB) mais sont exprimées sous forme résumée (une formule mathématique ; ici,  $1N + 3B$ ). Platon décrit le monde selon des lois, des idées, des formes générales. Il est par conséquent dans l'attitude d'un observateur *non engagé dans les phénomènes*. Pour lui, le fermier est dans la superposition :

« Fermier ayant observé une poule noire *et* blanche *et* blanche *et* blanche ».

Aristote quant à lui, est fort satisfait du *second principe* (« *N'empruntant qu'un chemin possible, l'observateur avance de OU en OU* »). Se fiant à ses perceptions, à ses sens, à la réalité immédiate, seul le phénomène – la poule qui surgit sous les yeux de l'observateur – a une réalité. Pour lui, le fermier est dans l'état :

« Fermier ayant observé une poule noire *ou* blanche *ou* blanche *ou* blanche ».

Pour Aristote, c'est la répétition des observations individuelles qui conduit au concept mathématique et il exploite les statistiques du fermier gravées dans le bois du poulailler :

**BNBBBBBNBBNBBBBBBBNBNBBBBBNBBBBBNBNBNBBBNBBNBBBBBNBBN**

Et il en déduit les proportions NBBB qu'il considère *non pas comme une forme idéale donnée a priori* mais comme une *construction intellectuelle* dont la réalité n'est pas gravée dans le ciel des idées.

La logique quantique telle qu'énoncée dans le premier principe (« *La Nature explore tous les chemins possibles* ») et le deuxième principe (« *Un observateur n'emprunte que l'un des chemins possibles* ») réconcilie Platon et Aristote. L'observateur non engagé dans les phénomènes (Platon) décrit la forme que revêt la réalité vécue par un observateur engagé (Aristote). La réalité vécue par un observateur reste toutefois à jamais inconnue pour d'autres observateurs. C'est en répétant les observations individuelles qu'un observateur engagé peut accéder à une description des lois physiques.

Le soir est venu. Les poules sommeillent et le fermier s'apprête à les imiter. Avant de s'endormir, il repense à sa journée. Ce fut vraiment une bonne journée. Il s'est tout d'abord convaincu que la Nature explorait bien tous les chemins possibles et pas seulement dans les laboratoires des physiciens. Pour couronner le tout, il a réconcilié Platon et Aristote grâce à la logique quantique. Vraiment, une très bonne journée.

***L'« effondrement » de la fonction d'onde, selon L. Susskind<sup>1</sup>***

«La mécanique quantique comprend un ensemble de règles actualisant la fonction d'onde d'un système au fur et à mesure que le temps passe. Sous sa forme la plus générale, le système en question est tout – l'ensemble de l'univers observable, y compris l'observateur qui fait des observations. Dans la mesure où le terme d'observateur recouvre des bouts de matière distincts, la théorie peut donner lieu à des observations cohérentes. La fonction d'onde contient tout cela, d'une certaine façon qui s'avère cohérente si deux observateurs différents confrontent leurs résultats. [...]

S [l'observateur] peut ouvrir la boîte et regarder si le chat est mort ou vivant. Si le chat est vivant, S peut jeter la branche chat-mort de la fonction d'onde. Cette branche, un peu plus tard, aurait contenu toutes les informations sur le monde dans lequel on aurait tiré sur le chat, mais comme S a découvert le chat vivant, il n'a plus besoin de cette information. Il existe une expression désignant le procédé qui consiste à supprimer les branches non observées d'une fonction d'onde chaque fois qu'on fait une observation : on parle de *l'effondrement de la fonction d'onde*. C'est une astuce très commode qui permet au physicien de se concentrer uniquement sur ce qui, par la suite, mérite qu'on s'y intéresse. La branche chat-vivant, par exemple, possède des informations qui peuvent encore intéresser S. [...]

Mais l'effondrement de la fonction d'onde ne fait pas partie des mathématiques de la mécanique quantique. Cela n'a aucun rapport avec les règles mathématiques. Bohr a eu recours artificiellement à cette astuce afin de terminer l'expérience par une observation. Cette règle arbitraire a fait souffrir

---

<sup>1</sup> Leonard Susskind. *Le paysage cosmique* (2007). *Folio Essais*. Gallimard, pp. 482–6.

NB : Dans ces extraits, l'auteur (ou le traducteur ?) parle de Bohr ; en fait c'est la « règle de Born », du nom du physicien Max Born, qui interprète de façon probabiliste les coefficients linéaires des états superposés (ces coefficients sont alors assimilés à des amplitudes de probabilité).



des générations de physiciens. Une bonne partie du problème vient de ce que S a limité son système à ce qui se trouve dans la boîte, mais qu'à la fin de l'expérience S entre lui-même en scène pour procéder à l'observation. On s'accorde désormais sur le fait qu'une description cohérente doit nécessairement inclure S dans le système. [...]

A la suite de Bohr, la plupart des physiciens ont eu tendance à considérer les branches comme des fictions mathématiques, à l'exception de la branche sur laquelle ils se trouvaient à la suite d'une observation. L'effondrement d'une fonction d'onde constitue un excellent stratagème pour se débarrasser de tous les bagages superflus, mais bon nombre de physiciens n'y voient qu'une intervention extérieure arbitraire de l'observateur – une procédure qui ne se fonde aucunement sur les mathématiques de la mécanique quantique. Pourquoi faudrait-il que les mathématiques suscitent toutes les autres branches si celles-ci doivent être systématiquement jetées aux orties ? [...]

La règle de Bohr n'est qu'une astuce pour se débarrasser de toutes les autres branches, qui *tout en étant parfaitement réelles, n'auront aucun effet ultérieur sur l'observateur*».

