

Les dés jouent-ils
aux dieux ?

Ian Stewart

Les dés jouent-ils aux dieux ?

Les mathématiques de l'incertitude

Traduit de l'anglais par
Christian Jeanmougin

DUNOD

First published under the title *Do dice pay god?* in Great Britain in 2019 by Profile Books LTD.
Copyright © Joat Enterprises, 2019

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée sous le titre :
Do dice play god? au Royaume-Uni, en 2019,
par Profile Books LTD.

Couverture : Élisabeth Hébert
Relecture éditoriale : Laurent Brasier
Mise en pages : Nord Compo

© Dunod, 2020 pour la traduction française
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-080429-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

1

Les six âges de l'incertitude

« Incertain : qui n'est pas établi avec exactitude, connu avec certitude ; qui n'est pas sûr, qui peut se produire ou non, être tel ou tel. »

Dictionnaire Larousse

L'incertitude n'est pas toujours une mauvaise chose. Nous aimons les surprises, tant qu'elles sont agréables. Nombre d'entre nous aiment parier sur les chevaux, et la plupart des sports seraient sans intérêt si nous connaissions le vainqueur dès le départ. Certains parents *ne veulent pas* connaître à l'avance le sexe de leur bébé. Et je soupçonne que la plupart d'entre nous préféreraient ne pas connaître la date de leur propre mort, et encore moins savoir comment elle surviendra. Mais ce sont là des exceptions. La vie est une loterie. L'incertitude alimentant souvent le doute, et le doute nous mettant mal à l'aise, nous cherchons à la réduire, ou mieux, à l'éliminer. Nous nous inquiétons de *ce qui va arriver*. Nous surveillons les prévisions météo même si nous savons que le temps est notoirement imprévisible et que les prévisions sont souvent fausses.

Lorsque nous regardons les infos à la télé, ou que nous lisons un journal, ou que nous surfons sur le Web, notre impuissance à anticiper les événements est parfois atterrant. Les avions s'écrasent au hasard.

Les tremblements de terre et les volcans détruisent des zones urbaines parfois considérables. Le secteur financier a des hauts et des bas, et bien que nous parlions du « cycle de hausses et de baisses », nous ne voulons rien dire d'autre qu'une hausse suit une baisse et qu'une baisse suit une hausse. Nous n'avons qu'une vague idée du moment où l'une va succéder à l'autre. Nous pourrions aussi bien parler du « cycle pluie-sécheresse » et prétendre prévoir le temps. Lorsque des élections se profilent à l'horizon, nous surveillons les sondages dans l'espoir d'en tirer une indication sur le nom du vainqueur. S'ils semblent avoir perdu de leur fiabilité ces dernières années, ils n'en conservent pas moins le pouvoir de nous rassurer ou de nous contrarier.

Parfois, nous sommes plus que dans l'incertitude : nous ne sommes pas certains de savoir ce dont nous devrions ne pas être certains. La plupart d'entre nous s'inquiètent du changement climatique, mais une bruyante minorité affirme qu'il s'agit là d'un canular – monté par des scientifiques (qui ne pourraient en monter un pour sauver leurs propres vies), ou par les Chinois, ou peut-être des Martiens ... à vous de choisir votre théorie du complot préférée. Mais même les climatologues qui ont prédit le changement climatique n'avancent guère de certitudes sur ses conséquences précises. Ils ont cependant une vision relativement claire de leur caractère général, et en pratique, c'est plus que suffisant pour déclencher la sonnette d'alarme.

Non seulement nous ne sommes pas certains de ce que Dame nature nous réserve, mais en outre nous ne sommes pas trop sûrs de ce que nous nous réservons à nous-mêmes. Alors que les économies mondiales ne se sont pas encore remises de la crise financière de 2008, les personnes qui l'ont provoquée mènent pour la plupart leurs activités comme avant, ce qui risque d'entraîner un désastre financier encore plus important. Nous sommes loin de savoir prédire le comportement de la finance mondiale.

Après une période de relative (et historiquement inhabituelle) stabilité, la politique mondiale se fissure aujourd'hui de plus en plus et les vieilles certitudes se trouvent ébranlées. Les « infox » submergent la réalité des faits dans un déluge de désinformation. Naturellement, ceux qui se plaignent le plus de cela sont souvent les faussaires eux-mêmes.

Au lieu de démocratiser le savoir, l'Internet a démocratisé l'ignorance et le sectarisme. En supprimant les garde-fous, il a ouvert la voie à la cacophonie.

Les affaires humaines ont toujours été un désordre, mais même en science, la vieille idée d'une nature obéissant à des lois exactes a cédé la place à une vision plus souple. Certaines règles, certains modèles sont approximativement vrais (dans certains secteurs, « approximatif » signifie « à dix décimales près », dans d'autres, « entre dix fois moins et dix fois plus »), mais ils sont toujours provisoires et doivent être remplacés dès que surviennent de nouvelles données. La théorie du chaos nous dit que même lorsqu'une chose obéit effectivement à des règles strictes, elle peut malgré tout être imprédictible. La théorie quantique nous dit qu'à ses niveaux les plus infimes, l'univers est *intrinsèquement* imprévisible. L'incertitude n'est pas seulement un signe d'ignorance humaine ; elle est l'élément constitutif du monde.

Nous pourrions simplement, à l'instar de nombreuses personnes, accepter l'avenir avec fatalisme. Mais la plupart d'entre nous n'apprécie pas ce mode de vie. Nous le soupçonnons de conduire à un désastre que quelques précautions suffiraient probablement à éviter. Une tactique courante, lorsqu'une chose nous déplaît, consiste soit à nous en prémunir, soit à tenter de la modifier. Mais quelles précautions prendre lorsque nous ignorons ce qui va arriver ? Après la catastrophe du *Titanic*, on obligea les navires à installer des canots de sauvetage supplémentaires. Leur poids provoqua le chavirage de l'*Eastland* sur le lac Michigan, au cours duquel 848 personnes moururent. La loi des Conséquences inattendues peut déjouer les meilleures intentions.

Nous nous intéressons à l'avenir parce que nous sommes des animaux *time-binders*, doués de la faculté de lier différents moments temporels. Nous avons une conscience profonde de notre position dans le temps, nous anticipons les événements futurs, et nous agissons maintenant en fonction de ces anticipations. Nous n'avons pas de machines à voyager dans le temps, mais nous nous comportons souvent comme si nous en avions, de sorte qu'un événement à venir nous amène à agir avant qu'il ne survienne. Bien sûr, la cause réelle de notre action aujourd'hui n'est

pas le mariage, ou l'orage, ou le paiement du loyer prévu pour demain. C'est notre présente conviction qu'ils auront lieu. Nos cerveaux, façonnés par l'évolution et l'apprentissage individuel, nous permettent aujourd'hui de décider des actes qui faciliteront notre vie demain. Les cerveaux sont des machines à décider, en devinant l'avenir.

Le cerveau prend certaines décisions avec une fraction de seconde d'avance. Lorsqu'un joueur de cricket ou de base-ball attrape la balle, il s'écoule un instant, petit mais non nul, entre la détection de la balle par le système visuel du joueur et la détermination par son cerveau de la position de cette balle. Fait remarquable, les joueurs attrapent habituellement la balle parce que leur cerveau est plus que doué pour anticiper sa trajectoire, mais quand ils cafouillent sur une balle apparemment facile, c'est que soit la prédiction soit leur réaction à cette prédiction était erronée. Ce processus étant entièrement inconscient et apparemment continu, nous ne remarquons pas que nous passons nos vies entières dans un monde qui fonctionne avec une fraction de seconde d'avance sur notre cerveau.

D'autres décisions peuvent se prendre des jours, des semaines, des mois, des années, voire des décennies à l'avance. Nous nous levons à temps pour prendre le bus ou le métro qui nous mène au travail. Nous achetons de la nourriture pour les repas du lendemain, ou de la semaine prochaine. Nous programmons une sortie en famille pour le prochain jour férié, et tous ceux qui y participeront font des choses *maintenant* pour être prêts *le jour venu*. En Grande-Bretagne, les familles aisées inscrivent leurs enfants dans des écoles huppées avant leur naissance. Les plus riches d'entre elles plantent des arbres qui n'atteindront pas leur maturité avant plusieurs siècles, de sorte que leurs arrière-arrière-arrière-petits-enfants jouiront d'une vue impressionnante.

Comment le cerveau prédit-il l'avenir ? Il construit des modèles internes simplifiés simulant le fonctionnement du monde, ou son fonctionnement potentiel, ou son fonctionnement présumé. Il entre ce qu'il sait dans le modèle, puis observe le résultat. Si nous repérons un tapis mal posé, l'un de ces modèles nous dit qu'il peut présenter un danger et amener quelqu'un à trébucher et tomber dans l'escalier. Par mesure de précaution, nous remettons alors le tapis en place. Peu importe que

cette prédiction soit ou non vérifiée. En fait, si nous avons correctement remis le tapis en place, elle *ne peut* être vérifiée, car les conditions entrées dans le modèle ne sont plus valides. Toutefois, l'évolution ou l'expérience personnelle peuvent tester le modèle et l'améliorer en regardant ce qui se passe dans des cas similaires lorsque l'on ne prend pas de précautions.

Les modèles de ce type n'ont pas besoin d'être des descriptions précises du fonctionnement du monde. Ils correspondent plutôt à des *convictions* sur le fonctionnement du monde. Durant des dizaines de milliers d'années, le cerveau humain a en effet évolué pour devenir une machine à prendre des décisions fondées sur ces convictions concernant l'issue de ces décisions. Il n'est donc pas surprenant que l'un des tout premiers moyens que nous ayons trouvés pour faire face à l'incertitude ait été de construire un système de croyances en des êtres surnaturels maîtrisant la nature. Nous savions que *nous* ne la maîtrisions pas, mais elle nous surprenait constamment, souvent désagréablement, de sorte qu'il semblait raisonnable de supposer que certaines entités non humaines – des esprits, des fantômes, des dieux, des déesses – avaient, *elles*, le pouvoir de lui commander. Bientôt apparut une classe spéciale de personnes, qui affirmaient pouvoir intercéder auprès des dieux pour nous aider, nous les mortels, à atteindre nos objectifs. Ceux qui affirmaient prédire l'avenir – les prophètes, les voyants, les cartomanciens, les oracles – devinrent des membres particulièrement appréciés de la communauté.

Ce fut le premier Âge de l'Incertain. Nous avons inventé des systèmes de croyances, qui devinrent de plus en plus sophistiqués parce que chaque génération voulait les rendre plus impressionnants. Nous avons justifié l'incertitude de la nature par la volonté des dieux.

Cette toute première phase de la confrontation consciente de l'homme avec l'incertitude dura des milliers d'années. Elle fut conforme avec les témoignages, car tout ce qui arrivait était vraisemblablement la volonté des dieux. Si les dieux étaient contents, de bonnes choses arrivaient ; s'ils étaient en colère, de mauvaises choses arrivaient. La preuve, si de bonnes choses vous arrivaient, cela signifiait à l'évidence que vous

faisiez plaisir aux dieux, et si de mauvaises choses vous arrivaient, c'était parce que vous les aviez mis en colère. Les croyances associées aux dieux devinrent ainsi liées à des impératifs moraux.

Finalement, un nombre croissant de gens commencèrent à penser que des systèmes de croyances aussi accommodants n'*expliquaient* rien du tout. Si le ciel était bleu parce que les dieux l'avaient fait ainsi, il aurait aussi bien pu être rose ou violet. L'humanité se mit alors à explorer une façon différente de penser le monde, fondée sur le raisonnement logique confirmé (ou infirmé) par l'observation.

Ce fut la science. Elle explique le bleu du ciel par la diffusion de la lumière par de fines poussières présentes dans la haute atmosphère. Cela n'explique pas pourquoi le bleu *semble* bleu ; les neuroscientifiques travaillent sur ce sujet, mais la science n'a jamais prétendu tout expliquer. Au fil de son développement, la science connut des succès de plus en plus nombreux accompagnés de quelques terribles échecs, et commença à nous donner la capacité de contrôler certains aspects de la nature. La découverte du lien entre l'électricité et le magnétisme, au XIX^e siècle, fut l'un des premiers exemples véritablement révolutionnaires de technologisation de la science qui affectèrent l'existence de pratiquement tout le monde.

La science nous a montré que la nature peut être moins incertaine que nous le pensons. Les planètes n'errent pas dans le ciel au gré de divins caprices : hormis d'infimes perturbations qu'elles se communiquent les unes aux autres, elles décrivent des orbites elliptiques régulières. On peut déterminer l'ellipse adéquate, comprendre l'effet de ces infimes perturbations, et prédire où se trouvera une planète dans plusieurs siècles – de fait, dans des millions d'années actuellement, modulo les limitations imposées par la dynamique du chaos. Il existe des lois naturelles ; nous pouvons les découvrir et les utiliser pour prédire ce qui va arriver. À l'inconfortable sentiment d'incertitude s'est substituée la conviction que la plupart des choses sont explicables pour peu que l'on parvienne à trouver leurs lois sous-jacentes. Des philosophes ont commencé à se demander si l'univers tout entier ne résulte pas simplement de l'action de ces lois sur des temps incommensurables. Peut-être le libre arbitre n'est-il qu'une illusion, et que tout n'est qu'un énorme mécanisme d'horlogerie.

Peut-être que l'incertitude n'est qu'une ignorance temporaire. Avec suffisamment de travail et de réflexion, tout peut s'éclaircir. Ce fut le second Âge de l'Incertain.

La science nous a aussi obligés à trouver un outil permettant de quantifier efficacement la certitude ou l'incertitude d'un événement, à savoir sa probabilité. L'étude de l'incertitude est devenue une nouvelle branche des mathématiques, et ce livre se propose essentiellement d'examiner les différentes manières dont nous avons exploité les mathématiques afin de rendre notre monde plus certain. De nombreux autres domaines, tels la politique, l'éthique et l'art, ont également apporté leur contribution, mais je me concentrerai sur le rôle des mathématiques.

La théorie des probabilités est née des besoins et de l'expérience de deux groupes de personnes très différents : les joueurs et les astronomes. Les joueurs voulaient une meilleure compréhension « des chances », les astronomes voulaient tirer des observations précises de leurs télescopes imparfaits. À mesure que les idées de la théorie des probabilités pénétrèrent dans la conscience humaine, cette spécialité sortit de son confinement originel et nous informa non seulement sur les jeux de dés et les orbites des astéroïdes, mais aussi sur les principes fondamentaux de la physique. Chaque seconde, pratiquement, nous inhalons de l'oxygène et d'autres gaz. Les innombrables molécules qui composent l'atmosphère s'entrechoquent les unes les autres comme de minuscules boules de billard. Si elles s'accumulaient toutes dans un coin de la pièce tandis que nous nous trouvons dans le coin opposé, nous aurions un souci. En théorie, cela peut arriver, mais selon les lois des probabilités, c'est si rare qu'en pratique cela n'arrive jamais. L'air forme un mélange uniforme en raison de la deuxième loi de la thermodynamique, qui est souvent interprétée comme disant que l'univers évolue sans cesse vers plus de désordre. Cette deuxième loi a aussi un lien quelque peu paradoxal avec la direction de l'écoulement du temps. Ce sont là des choses profondes.

La thermodynamique entra relativement tard sur la scène scientifique. Lorsqu'elle arriva, la théorie des probabilités s'était déjà introduite dans le monde des affaires humaines – les naissances, morts, divorces, suicides, crimes, tailles, poids et politiques. Sa branche appliquée, la

statistique, était déjà née. Elle nous donna de puissants outils pour analyser tout ce qui va des épidémies de rougeole aux intentions de vote pour la prochaine élection. Elle nous éclaira, certes moins que nous l'aurions souhaité, sur le monde trouble de la finance. Elle nous dit que nous sommes des créatures flottant sur un océan de probabilités.

La théorie des probabilités, et sa branche appliquée, la statistique, ont dominé le troisième Âge de l'Incertitude.

Le quatrième Âge de l'Incertitude arriva par surprise, au début du xx^e siècle. Jusqu'alors, toutes les formes d'incertitude que nous rencontrions avaient un point commun : elles étaient le reflet de l'ignorance humaine. Si nous n'étions pas certains d'une chose, c'était parce que nous n'avions pas l'information nécessaire pour la prédire. Considérez le jeu de pile ou face. Il est l'une des icônes traditionnelles de l'aléatoire. Pourtant, une pièce de monnaie est un mécanisme très simple, les systèmes mécaniques sont déterministes et, en principe, tout processus déterministe est prévisible. Si nous connaissions toutes les forces qui agissent sur une pièce – sa vitesse initiale et la direction de son lancer, sa vitesse et son axe de rotation, nous pourrions utiliser les lois de la mécanique pour déterminer le côté gagnant.

De nouvelles découvertes en physique fondamentale nous forcèrent à revoir ce point de vue. C'est peut-être vrai des pièces de monnaie, mais parfois l'information dont nous avons besoin n'est tout simplement pas disponible parce que la nature elle-même ne la connaît pas. Vers 1900, les physiciens commençaient à comprendre la structure de la matière aux très petites échelles – celle non seulement des atomes, mais aussi des particules subatomiques qui composent les atomes. La physique classique, celle qui émergea des percées réalisées par Isaac Newton avec les lois du mouvement et la gravitation, avait donné à l'humanité une vaste compréhension du monde physique, testée à l'aide de mesures de plus en plus précises. Toutes ces théories et expériences ont conduit à deux manières de penser le monde : en termes de particules et en termes d'ondes.

Une particule est une infime masse de matière, bien délimitée et bien localisée. À l'instar des rides qui se propagent à la surface de l'eau, une onde est une perturbation en mouvement, plus éphémère qu'une particule et

s'étendant sur un domaine spatial plus vaste. On peut calculer les orbites planétaires en assimilant les planètes à des particules. Les distances entre les planètes et les étoiles sont en effet si grandes que si vous ramenez le tout à l'échelle humaine, les planètes *deviennent* des particules. Le son est une perturbation qui se propage dans l'air, même si l'air tout entier reste pratiquement à la même place – c'est donc une onde. Les particules et les ondes sont des icônes de la physique classique, mais sont des objets très différents.

1678 fut l'année d'une grande controverse sur la nature de la lumière. Christiaan Huygens présenta à l'Académie des sciences de Paris une théorie affirmant que la lumière est une onde. Newton était convaincu que la lumière est un flux de particules, et sa vision prévalait à l'époque. Finalement, après un siècle d'errements, de nouvelles expériences tranchèrent la question. Newton avait tort : la lumière est une onde.

Vers 1900, les physiciens découvrirent l'effet photoélectrique : la lumière frappant certains métaux pouvait générer un petit courant électrique. Albert Einstein en déduisit que la lumière est un flux d'infimes particules : les photons. Newton avait raison depuis le début. Sa théorie avait toutefois été écartée pour une bonne raison : nombre d'expériences montraient très clairement que la lumière est une onde. Le débat s'ouvrit de nouveau. La lumière était-elle une onde ou une particule ? La réponse fut finalement « les deux ». La lumière se comporte tantôt comme une particule, tantôt comme une onde. Ça dépend de l'expérience. Tout cela était bien mystérieux.

Quelques pionniers virent rapidement comment résoudre ce mystère : la mécanique quantique était née. Toutes les certitudes classiques telles que la position et la vitesse d'une particule, n'étaient plus pertinentes à l'échelle subatomique de la matière. Le monde quantique fourmille d'incertitudes. Plus vous mesurez avec précision la position d'une particule, moins vous avez de certitude sur sa vitesse. Pire, la question « où est-elle ? » n'a pas de réponse claire. Le mieux que vous pouvez faire est de la représenter par sa probabilité de présence en un endroit donné. Une particule quantique n'est en rien une particule, elle n'est qu'un nuage de probabilités.

Plus les physiciens sondaient les profondeurs du monde quantique, plus tout devenait flou. Ils pouvaient le décrire mathématiquement,

mais avec des mathématiques étranges. En quelques décennies, ils se convainquirent que les phénomènes quantiques sont irréductiblement aléatoires. Le monde quantique *est* réellement fait d'incertitude, il n'y a aucune information manquante, et il n'existe aucun niveau de description plus profond. « Tais-toi et calcule », tel devint le mot d'ordre – et ne posez pas de questions embarrassantes sur tout ce que cela signifie.

Tandis que la physique poursuivait sa route quantique, les mathématiques se frayèrent un nouveau chemin. On pensait habituellement que le contraire d'un processus aléatoire est un processus déterministe : pour un présent donné, un seul futur est possible. Le cinquième Âge de l'Incertainité émergea lorsque des mathématiciens, et quelques physiciens, découvrirent qu'un système déterministe peut être imprévisible. C'est la théorie du chaos, un nom donné par les médias à la dynamique non linéaire. Le développement de la théorie quantique aurait pu être passablement différent si les mathématiciens avaient fait bien plus tôt cette découverte cruciale. En fait, un exemple de chaos fut découvert avant la théorie quantique, mais il fut considéré comme une curiosité isolée. Il fallut attendre les années 1960 et 1970 pour voir apparaître une théorie cohérente du chaos. Mais pour des raisons de présentation, j'aborderai la théorie du chaos avant la théorie quantique.

« La prédiction est un art très difficile, surtout lorsqu'elle concerne l'avenir », a dit un jour le physicien Niels Bohr (à moins que ce ne soit Yogi Berra ? Vous voyez, on ne peut même pas être certain de *ça*¹). Ce n'est pas aussi drôle qu'il y paraît, car la prédiction est différente de la prévision. En science, la plupart des prédictions prédisent qu'un événement survient dans certaines conditions, sans dire *quand*. Je peux prédire qu'un tremblement de terre survient parce que des contraintes s'accumulent dans les roches, et l'on peut tester cette prédiction en mesurant ces contraintes. Mais cette méthode ne prévoit pas le tremblement de terre, ce qui exige que l'on détermine à l'avance *quand* il surviendra. On peut même « prédire » qu'un événement est effectivement arrivé dans le passé. Si personne ne l'a remarqué jusqu'à ce qu'on le retrouve dans les archives, cette prédiction constitue un test valide d'une théorie. Je sais que cela est souvent appelé une « postdiction », mais dans le cas du