



HAL
open science

Comment la statistique est-elle entrée en physique ?

Olivier Rey

► **To cite this version:**

Olivier Rey. Comment la statistique est-elle entrée en physique ?. *Almagest*, 2024, 2023 (2), pp.246-254. halshs-04365027

HAL Id: halshs-04365027

<https://shs.hal.science/halshs-04365027v1>

Submitted on 8 Jan 2024

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

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

Comment la statistique est-elle entrée en physique ?

Olivier REY

Dans son maître ouvrage intitulé *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition*¹, Alistair Cameron Crombie distingue, à l'intérieur de la pensée et de la recherche scientifiques, six grands styles différents, depuis le style mathématique, dont les *Éléments* d'Euclide demeurent un exemple paradigmatique, jusqu'au style qui consiste à comprendre l'état présent du monde comme résultat de processus historiques d'évolution et de diversification. En cinquième position, figurent l'analyse statistique et le calcul des probabilités, reconnus comme constituant un style à part entière de la pensée scientifique. Un style qui trouve largement à se déployer en physique, au point que la physique statistique constitue, depuis le début du XX^e siècle, un secteur répertorié et particulièrement dynamique de cette science.

Aujourd'hui qu'il existe une branche des mathématiques consacrée à la statistique, il est facile d'imaginer que le recours à la statistique dans les sciences de la nature est une simple conséquence du programme galiléen de déchiffrement du monde par les mathématiques. Cela étant, quand Galilée affirmait que l'univers était écrit en langue mathématique, il précisait que les caractères de cette langue étaient des « triangles, cercles et autres figures de géométrie² ». Autrement dit, la mathématisation que Galilée avait en vue était d'abord une géométrisation. Du reste, la précision quantitative était au XVII^e siècle difficile à obtenir, faute des instruments de mesure adéquats, et faisait largement défaut. Il fallut attendre le XIX^e siècle pour voir un véritable changement intervenir sur ce point. Thomas Kuhn introduit une distinction entre les sciences « classiques » – astronomie, optique, statique, harmonie – et ce qu'il appelle les sciences « baconiennes » comme l'électricité, le magnétisme, la chimie, l'étude des phénomènes

¹ Alistair Cameron CROMBIE, *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition: The History of Argumentation and Explanation, Especially in the Mathematical and Biomedical Sciences and Arts*, 3 vol., Londres, Duckworth, 1994.

² Galileo GALILEI, *Le Opere*, éd. Antonio Favaro, 20 vol., Florence, Gaspero Barbèra, 1890-1909, t. VI, p. 232.

calorifiques etc., qui jusqu'à la fin du XVIII^e siècle demeurèrent essentiellement qualitatives. Dans la première moitié du XIX^e siècle cependant, une évolution rapide se produisit : les sciences baconiennes se mathématisèrent et devinrent quantitatives. Kuhn juge ce tournant si important que, selon lui, il ne doit pas être considéré comme un prolongement de la grande révolution scientifique du XVII^e siècle, mais bel et bien comme une seconde révolution scientifique³. C'est dans le sillage de cette révolution que William Thomson, futur lord Kelvin, put élever la précision quantitative au rang de critère décisif pour juger du caractère scientifique d'un savoir : « Quand vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et l'exprimer par des nombres, vous savez quelque chose à son propos ; mais quand vous ne pouvez le mesurer, quand vous ne pouvez l'exprimer par des nombres, le savoir que vous en avez est pauvre et insatisfaisant : cela peut être le commencement du savoir, mais vous n'avez guère avancé, dans vos pensées, sur le chemin de la science, quel que soit le sujet considéré⁴. » Ce ne sont plus les « figures de géométrie » de Galilée mais les nombres qui, dans cette perspective, deviennent les éléments paradigmatiques de la science. Dès lors, il est facile d'imaginer que c'est l'exigence scientifique de quantification qui a présidé au développement des statistiques numériques aujourd'hui si répandues. Les études historiques démentent toutefois un tel scénario. C'est en effet d'abord dans les domaines économique, social et politique que la statistique a pris son essor. Excepté une utilisation marginale, au XVIII^e siècle, dans le traitement des mesures astronomiques (on cherchait à déterminer la valeur la plus probable d'une grandeur qui avait été mesurée par de multiples personnes ayant obtenu des résultats différents), c'est seulement au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle que la statistique fit son entrée dans les sciences de la nature. Et c'est plus tard encore, dans les premières décennies du XX^e siècle, qu'elle devint une branche des mathématiques. Pareille chronologie est d'une importance cruciale. Du fait de son ancrage initial dans le domaine des affaires économiques, sociales et politiques, la statistique parut d'abord humaine, trop humaine aux scientifiques et, en particulier, aux physiciens, pour que ceux-ci soient disposés à y recourir dans leurs investigations et théories. Les convaincre que la statistique pouvait, et même, en certaines occurrences, devait être mobilisée dans leur science ne fut pas une mince entreprise.

De nos jours, le nom de Laplace est associé à une conception totalement déterministe du monde. On cite toujours ses mots : « Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de ce qui va

³ Voir Thomas S. KUHN, « The Function of Measurement in Modern Physical Science », in *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago, University of Chicago Press, 1977.

⁴ William THOMSON, conférence « Electrical Units of Measurement », prononcée le 3 mai 1883 devant l'*Institution of Civil Engineers*, in *Popular Lectures and Addresses*, 3 vol., Londres-New York, Macmillan & Co, 1889-1994, t. 1, p. 73-74.

suivre », d'où résulte qu'« une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'Analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux⁵ ». Il convient, cependant, de prendre en compte l'endroit où ces propos figurent – à savoir les premières pages de *l'Essai sur les probabilités*. Pour Laplace, tous les efforts que l'esprit humain déploie « dans la recherche de la vérité tendent à le rapprocher sans cesse de l'intelligence que nous venons de concevoir, mais dont *il restera toujours infiniment éloigné* » (nous soulignons). On voit donc que Laplace, juste après avoir évoqué l'idéal d'une connaissance complète, reconnaît cet idéal comme radicalement inatteignable. De là – c'est le point crucial – l'importance fondamentale des *probabilités*, en lesquelles Laplace voit « le supplément le plus heureux à l'ignorance et à la faiblesse de l'esprit humain⁶ ». En accordant droit de cité aux probabilités, Laplace écartait le principal obstacle épistémologique à l'usage de la statistique dans les sciences physiques. Néanmoins, pour que cet usage devînt effectif, devait encore se présenter le champ spécifique où la nouvelle possibilité théorique se trouverait exploitée. Le champ en question fut la thermodynamique, alors en pleine expansion.

La thermodynamique confrontait les physiciens à un problème théorique : comment concilier les enseignements de cette nouvelle science avec la conception mécaniste du monde héritée de Newton, selon laquelle, en dernière analyse, tous les phénomènes physiques sont le produit de particules et des forces qui les font interagir ? La conservation de l'énergie pour les systèmes isolés suggérait qu'en dépit de tout ce qui différenciait chaleur et travail mécanique, un principe commun leur était sous-jacent. Étant donné les succès que la mécanique avait à son crédit, il ne manquait pas de physiciens pour penser que le chemin de l'unification passait par une « mécanisation » de la chaleur. Il fallait dans ce cas s'appliquer à comprendre la chaleur et autres grandeurs mises en jeu par la thermodynamique à partir de mouvements particuliers.

L'idée qu'un gaz est constitué d'un grand nombre de particules, et que les grandeurs associées à ce gaz, comme la pression, sont liées aux mouvements animant ces particules, fut émise dès le XVII^e siècle, et exploitée dans les années 1730 par Daniel Bernoulli. Elle se trouva reprise au XIX^e siècle par un certain nombre de physiciens dont John Herapath, John James Waterston, James Prescott Joule, August Krönig ou Rudolf Clausius, dont les travaux ouvrirent la voie à ceux de James Clerk Maxwell. D'une part,

⁵ Pierre-Simon de LAPLACE, *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), Paris, Bourgeois, coll. « Épistémè », 1986, p. 32-33.

⁶ *Ibid.*, p. 206.

Maxwell fut le premier à introduire, en 1862, une distribution de probabilités en physique – en établissant que les vitesses des molécules qui constituent un gaz doivent à l'équilibre se répartir selon une loi normale. D'autre part, il s'employa activement à convaincre ses collègues du bien-fondé de la démarche statistique en physique : son génie et son autorité ne furent pas de trop pour accréditer une démarche à laquelle la plupart d'entre eux étaient hostiles ou pour le moins réticents. Une conférence intitulée « Molécules », donnée en 1873 devant la *British Association for the Advancement of Science*, illustre les efforts que Maxwell déploya pour faire accepter son recours à la statistique.

Tant que nous ne nous occupons que de deux molécules, et que nous possédons toutes les données, nous pouvons calculer le résultat de leur rencontre ; mais lorsque nous devons nous occuper de millions de molécules, dont chacune d'entre elles entre en collision des millions de fois par seconde, la complexité du problème semble exclure tout espoir de solution valable. Les atomistes modernes ont par conséquent adopté une méthode qui est, je crois, nouvelle dans le département de la physique mathématique, même si elle est en usage depuis longtemps dans la section de statistique. Quand les membres de cette section reçoivent un rapport de recensement, ou tout autre document contenant les données numériques de la science économique et sociale, ils commencent par répartir la population en différents groupes, selon l'âge, l'impôt, l'instruction, la religion ou les condamnations criminelles. Le nombre des individus est beaucoup trop grand pour qu'il soit possible de retracer l'histoire de chacun en particulier, de sorte que, pour ramener leur travail aux capacités humaines, ils concentrent leur attention sur un petit nombre de groupes artificiels. Le nombre variable d'individus dans chaque groupe, et non l'état variable de chaque individu, est la donnée primaire à partir de laquelle ils travaillent⁷.

À la méthode que Maxwell appelle « historique », qui voudrait que l'on calcule le mouvement de chaque particule à partir des conditions initiales et des lois du mouvement, est opposée la méthode statistique, seule praticable quand les particules sont en grand nombre.

Les équations de la dynamique expriment complètement les lois de la méthode historique lorsqu'elle est appliquée à la matière, mais l'application de ces équations implique une connaissance parfaite de toutes les données. [...] Nous ne pouvons établir le mouvement réel d'aucune de ces molécules, de sorte que nous sommes obligés d'abandonner la méthode strictement historique, et d'adopter la méthode statistique pour traiter de grands groupes de molécules⁸.

Un point mérite d'être souligné. Les cas abondent où le siècle a transmis à la science certaines questions, auxquelles les scientifiques se sont efforcés de répondre selon les méthodes qui leur sont propres. Ici, la situation est inverse : le problème que la

⁷ *Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, éd. William Davidson Niven, 2 vol. Cambridge, Cambridge University Press, 1890, t. 2, p. 373.

⁸ *Ibid.*, p. 374.

théorie cinétique des gaz essaye de résoudre – à savoir relier la thermodynamique à la mécanique – est interne à la physique, et essentiellement suscitée par un désir d'unité théorique ; en revanche, la méthode mise en œuvre pour y parvenir est, en quelque sorte, importée, dans la mesure où la statistique a pris naissance et s'est développée dans le traitement des affaires humaines bien avant d'être mobilisée par les sciences de la nature – ainsi que le discours de Maxwell le reconnaît explicitement⁹.

Maxwell n'a pas eu recours à la statistique « faute de mieux » : il a considéré qu'elle était la méthode adaptée à la situation, propre à rendre compte de certains phénomènes tels que nous les appréhendons.

Si la théorie qui veut que les corps soient constitués de molécules est vraie, alors tout notre savoir de la matière est de nature statistique. [...] La plus petite partie d'un corps que nous sommes capables de discerner est composée d'un grand nombre de ces molécules, et tout ce que nous pouvons obtenir à propos de ce groupe de molécules est une information statistique [...] Par conséquent ces régularités que nous observons dans nos expériences avec des quantités de matières qui contiennent des millions de millions de molécules sont des régularités du même type que celles expliquées par Laplace et dont s'émerveille Buckle, résultant du fait qu'une multitude de cas échoient ensemble, aucun d'eux n'étant semblable aux autres¹⁰.

Maxwell alla même jusqu'à supposer que les lois statistiques auraient pu constituer un paradigme dominant :

La méthode statistique [...] qui dans l'état présent de notre savoir est la seule dont nous disposions pour étudier les propriétés des corps matériels, implique un renoncement aux principes dynamiques stricts, et le recours à des méthodes mathématiques ressortissant à la théorie des probabilités. Il est probable que des résultats importants pourront être obtenus par cette méthode, encore peu connue et à laquelle nos esprits ne sont pas accoutumés. Si l'histoire de la science avait connu un autre cours, et si les doctrines scientifiques qui nous sont les plus familières avaient précisément été celles qui doivent être exprimées de cette manière, nous aurions peut-être considéré l'existence d'une certaine forme de contingence comme une évidence, et la doctrine du déterminisme absolu comme un simple sophisme¹¹.

Cela étant, la théorie cinétique des gaz ne pouvait relier certaines grandeurs thermodynamiques aux réalités particulières sans soulever un nouveau problème

⁹ Maxwell avait lui-même pris connaissance, dans les années précédant ses travaux en cinétique des gaz, des ouvrages du statisticien belge Adolphe Quetelet, notamment grâce au long compte rendu qu'en avait donné John Herschel dans la *Edinburg Review*.

¹⁰ Maxwell s'exprime ainsi dans une conférence donnée à Cambridge en 1873 (voir Lewis CAMPBELL et William GARNETT, *The Life of James Clerk Maxwell, with a Selection from His Correspondence and Occasional Writings and a Sketch of His Contributions to Science*, Londres, Macmillan & Co., 1882, p. 439). Henry Thomas Buckle, dans son *History of Civilization in England* dont le premier volume parut en 1857, voulait que l'histoire devînt une science exacte, fondée en particulier sur la statistique qui aurait fait apparaître que les actions humaines obéissent à des lois aussi strictes que celles régissant la matière.

¹¹ « Introductory Lecture on Experimental Physics » (1871), in *Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, op. cit., t. 2, p. 253.

théorique redoutable : si les gaz sont composés de molécules dont les mouvements sont gouvernés par les lois de la mécanique, invariantes par renversement du temps, comment expliquer qu'à l'échelle macroscopique, certains phénomènes se produisent toujours dans la même direction ? La réponse fut donnée par Ludwig Boltzmann, qui trouva la solution dans la statistique elle-même. Il remarqua qu'à chaque état macroscopique distinct correspond un nombre variable d'états microscopiques sous-jacents (prenant en compte la position et la vitesse de chacune des particules). Moyennant certaines hypothèses, la probabilité qu'un état macroscopique se réalise est donnée par le nombre d'états microscopiques qui lui correspondent, comparé au nombre total des états microscopiques possibles. Or, le calcul montre que certains états macroscopiques sont si immensément plus probables que d'autres, que leur probabilité est pratiquement égale à un : l'irréversibilité n'est alors que la migration d'un état initial peu probable vers un état d'équilibre qui l'est bien davantage.

Certains adversaires de Boltzmann lui reprochèrent de formuler des résultats qui n'étaient pas absolument vrais, et ne valaient qu'en probabilité. Boltzmann reconnut le fait, mais fit remarquer que s'il est théoriquement possible que deux gaz qui se sont mélangés se séparent à nouveau spontanément, les calculs montrent que le temps nécessaire pour que la probabilité d'un tel événement devienne significative est monstrueusement long – de très loin supérieur à 10^{10} années !

On conviendra qu'il revient pratiquement au même de dire que cela ne se produira *jamais*, si l'on songe que, durant le même laps de temps, d'après les lois des probabilités, il devrait se trouver plusieurs années pendant lesquelles, par simple coïncidence fortuite, tous les habitants d'une grande ville se suicideraient le même jour, ou bien pendant lesquelles toutes les maisons de la même ville prendraient feu isolément le même jour, également par simple hasard ; cependant les compagnies d'assurance, d'accord avec l'expérience, ont raison de ne pas prendre de tels hasards en considération. Si des probabilités aussi faibles, et même d'autres encore beaucoup plus grandes comparées à la précédente, n'étaient pas pratiquement regardées comme identiques à des impossibilités, personne ne pourrait compter sur l'arrivée de la nuit à la fin de la journée et sur la venue, après la nuit prochaine, d'un autre jour¹².

Maxwell avait lui-même avancé quelque chose de ce genre à propos du deuxième principe de la thermodynamique qui, écrivait-il dans une lettre de 1870, avait « le même degré de vérité que l'assertion selon laquelle, si vous jetez un verre d'eau dans la mer, vous ne pouvez pas récupérer le même verre d'eau ».

Tout au long de sa carrière, Boltzmann rencontra une féroce hostilité de la part de collègues appartenant au monde scientifique germanique. Il avait le sentiment, à la fin

¹² Ludwig BOLTZMANN, *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vol., Leipzig, J. A. Barth, 1896-1898, t. 2, § 88, p. 254. L'origine de la statistique dans les affaires humaines se fait encore sentir dans les propos de Boltzmann, à travers la référence aux statistiques de suicide et aux statistiques assurantielles.

de sa vie (il se suicida en 1906 à l'âge de soixante-deux ans), que de son travail demeurerait sans suite. En réalité, sa postérité est immense.

Depuis le XIX^e siècle, l'attitude des praticiens des sciences de la nature à l'égard de la statistique a profondément changé. Au départ, une majorité d'entre eux se montraient méfiants, voire hostiles à l'usage en science de méthodes que leur ancrage premier dans les affaires humaines rendait suspectes, et qui leur semblaient incompatibles avec l'idéal intégralement déterministe alors cultivé. Au cours du XX^e siècle, le rapport s'est inversé : d'instrument d'étude et de gestion des affaires humaines, dont les scientifiques devaient apprendre à tirer parti dans leurs domaines respectifs, la statistique est devenue une branche des mathématiques et une méthode scientifique à part entière, dont les sciences sociales peuvent, le cas échéant, se réclamer pour asseoir leur discours. Pour ne donner qu'un exemple significatif d'un tel renversement : quand la Banque de Suède établit un prix en sciences économiques en mémoire d'Alfred Nobel, le premier lauréat, en 1969, fut Jan Tinbergen, ancien professeur de mathématiques et de statistique à l'Université Érasme de Rotterdam. Maxwell et Boltzmann durent, en leur temps, s'employer pour faire admettre à leurs collègues que la statistique, d'usage courant dans le champ économique et social, avait sa place en physique. Un siècle plus tard, économistes et praticiens des sciences sociales peuvent recourir à la statistique pour conférer à leur discours quelque chose de l'autorité des mathématiques et des sciences de la nature¹³.

¹³ Une grande partie des éléments figurant dans cet article sont repris du chapitre VII de l'ouvrage *Quand le monde s'est fait nombre* (Paris, Stock, « Les essais », 2016 ; édition revue et corrigée, Paris, Desclée de Brouwer, « Les Carnets DDB », 2021).