



Jean Perdijon

Pour faire bonne mesure

Entre faits et réalité

Jean Perdijon

Pour faire bonne mesure

Entre faits et réalité

La mesure est un outil au service de toutes les sciences d'observation. Elle est tout aussi présente dans la vie quotidienne car **il ne saurait exister de vie sociale sans consensus sur une commune mesure**. Entre science et technique, histoire et philosophie, l'auteur nous offre un voyage au cœur de la mesure. Il en donne d'abord les principes : son acquisition, sa qualité, son traitement statistique. Mais à quoi correspond le résultat obtenu ? Existe-t-il un monde réel au-delà de la mesure ? Y a-t-il des limites à une connaissance par la mesure, imposées par notre esprit ou par la nature ?

La mesure séduit peu. Mais elle est de plus en plus envahissante, au point de perdre parfois le sens de la mesure. **Chacun doit donc en connaître les principes et les enjeux**, pour ne pas accepter tout résultat qu'on voudrait lui faire accroire ou tout conditionnement qui lui serait imposé.

Ingénieur civil des mines, **Jean Perdijon** a pratiqué la mesure en analyse chimique, puis en contrôle des matériaux dans le domaine nucléaire. Auteur de manuels techniques et d'une quinzaine d'essais sur les sciences, dont une *Histoire de la physique*, il fut enseignant à l'École de physique de Grenoble.



9 782759 824274

The logo for 'edp sciences' features the letters 'edp' in a stylized, lowercase font with a red-to-orange gradient, followed by the word 'sciences' in a plain, lowercase, dark blue font. The entire logo is set against a light green circular background.
edp sciencesISBN : 978-2-7598-2427-4
www.edpsciences.org

Pour faire bonne mesure

Pour faire bonne mesure

Entre faits et réalité

JEAN PERDIJON



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Composition et mise en pages : Patrick Leleux PAO
Couverture : Conception graphique de B. Defretin, Lisieux
Illustration de couverture : peb & fox

Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-2427-4
ISBN (ebook) : 978-2-7598-2428-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2020

SOMMAIRE

<i>Introduction</i>	7
<i>Mesure du monde, monde de la mesure</i>	13
Un classement des mesures.....	13
Mesure avec un instrument.....	16
Mesure par indicateur	19
Mesure après enquête	20
La tentation du truquage	22

Partie 1 L'opération de mesurage

1. Les grandeurs de référence	27
Étalon et unité	28
Spécificité de l'étalon	29
Système cohérent d'unités.....	31
Choix des étalons fondamentaux.....	34
Système international	38
2. L'acquisition des mesures	43
Modes de comparaison à la référence	43
Chaîne de mesure et théorie de l'information	44
Capteurs	48
Lecture et présentation des résultats	50
Échantillonnage et organisation des mesures	52
3. La qualité des mesures	57
Courbe d'étalonnage.....	57
Qualités de constance et de mobilité	60
Surveillance des réglages	61
Qualité du service	62
4. Le traitement statistique des mesures	65
Erreurs et incertitude.....	65
Traitement statistique.....	68
Estimation d'une grandeur.....	70
Tests de comparaison.....	74
Études de liaison	75

Partie 2

L'interprétation de la mesure

5. La réalité et le concept de grandeur.....	81
Opérationnalisme ou réalisme ?.....	81
Corps et qualités.....	84
Concept de grandeur physique.....	86
Valeur des grandeurs.....	87
L'échelle du monde.....	91
La modélisation du réel	94
6. Les limites de la connaissance par la mesure.....	97
La curiosité des faits	97
Les conditions pour une mesure	99
Limites conceptuelles	101
Limites physiques	107
<i>Conclusion</i>	<i>117</i>

Annexes

A. Le Système international d'unités.....	121
1. Unités de base	121
2. Principales unités dérivées	123
3. Multiples	125
4. Règles d'écriture	126
B. Statistique appliquée aux mesures.....	127
1. Distribution d'un échantillon	127
2. Limite de détection	127
3. Cartes de contrôle	128
4. Distribution de la population	129
5. Tri infidèle d'une population	130
6. Comparaison de deux populations	131
7. Analyse de la variance	131
8. Régression linéaire	132
C. Brève chronologie	133
D. Glossaire.....	139
<i>Bibliographie.....</i>	<i>149</i>
<i>Index</i>	<i>151</i>

INTRODUCTION

Les chiffres, modelés par l'espace qui les entoure, sont clairs. À la différence des mots, ils ne fument pas, ils ne sentent pas. Les lois ne forcent personne, n'exigent rien. Elles donnent, tranquillement, la mesure du monde.

Jacques AUDIBERTI (*Le Retour du divin*)

Certaines mesures sont disciplinaires ou conservatoires, d'autres font valser quand elles sont à trois temps, enfin la mesure peut être considérée comme une preuve de modération. C'est précisément avec mesure que *nous nous limiterons à la mesure physique des objets matériels*. Cependant, malgré cette appellation et pour faire bonne mesure, les applications ne se trouveront pas uniquement en physique mais aussi en chimie, en biologie ou même dans les sciences humaines. La mesure constitue donc un thème fédérateur pour toutes les sciences : le chercheur mesure pour connaître une grandeur, afin d'établir la loi d'un phénomène. Bien que de nature moins absolue, la mesure est tout aussi présente dans la vie quotidienne pour vérifier une grandeur : le technicien mesure afin d'assurer l'interchangeabilité des pièces et la sécurité des installations ; le commerçant mesure afin

d'assurer la régularité des transactions. Car *il ne saurait exister de vie sociale sans consensus sur une commune mesure.*

Nos sens constituent nos premiers appareils de mesure, ceux que la Nature a bien voulu mettre à notre disposition. Dès le premier coup d'œil jeté sur le monde, nous y délimitons plus ou moins arbitrairement des corps, faits de matière, que nous distinguons par leurs qualités. Voilà ce que nous révèle une première appréhension du monde qui nous entoure. Et, lorsque nous perfectionnons ensuite notre analyse et nos moyens d'observation pour étudier la matière et ses interactions, nous continuons à décrire le monde en y délimitant des corps que nous distinguons par leurs qualités. Ces corps, ce peut être des particules, des atomes, des molécules, des cristaux, des pièces ou des assemblages plus complexes, des astres, des galaxies. Ils sont plus ou moins liés, comme les quarks d'un même proton, plus ou moins indépendants, comme les étoiles d'une même galaxie. Notre description pourrait se contenter d'être écrite en un langage littéraire. Mais l'homme ne se satisfait pas de reconnaître des objets, il veut expliquer le monde. Malheureusement, « c'est surtout ce qu'on ne comprend pas qu'on explique. L'esprit humain se venge de ses ignorances par ses erreurs » (Barbey d'Aurevilly).

Une première tentative d'explication est de dire que les choses sont destinées à être telles qu'elles sont : leur existence résulte d'un dessein, de la volonté d'un démiurge qu'il est prudent d'honorer. Une autre possibilité consiste à dire que les choses ne sont que le fruit du hasard ; il se trouve simplement qu'elles ont pris leur configuration particulière plutôt qu'une autre, moins probable, et on est seulement là pour les contempler. Le chercheur a toujours espéré que les lois de la nature fussent inévitables, c'est-à-dire que les choses sont telles qu'elles sont parce qu'il est impossible qu'elles soient autrement, mais il n'a jamais réussi à le prouver ! Son besoin de compréhension le conduit à classer les objets en regroupant ceux qui contiennent les mêmes grandeurs, à corrélérer les variations des

grandeurs pour en tirer des lois. Il adopte un point de vue objectif pour atteindre à l'intersubjectivité et il adapte son langage pour bénéficier de toute la puissance du raisonnement mathématique : il exprime l'intensité d'une grandeur non plus par des mots mais par des nombres, pour les faire entrer dans des relations. Ainsi, *la mesure est l'opération qui permet de passer de l'espace continu du Réel à l'espace discret du Connu*. Lors d'une conférence à des ingénieurs civils en 1883, lord Kelvin a prononcé cette maxime, maintes fois répétée depuis : « Je dis souvent que lorsqu'on peut mesurer ce dont on parle et l'exprimer en chiffres, on en sait quelque chose ; en revanche, si on ne peut l'exprimer en chiffres, on en a une bien piètre connaissance »¹. « Tout être connaissable a un nombre ; sans celui-ci, on ne saurait rien concevoir ni rien connaître », disait déjà le pythagoricien Philolaos au v^e siècle av. J.-C. Sèche précision du nombre.

Sous l'influence de Nicolas de Cues (« la mesure est la clef de la physique et l'acte propre de la raison appliquée à connaître la nature ») et de Galilée (« le grand livre de la nature est écrit en langage mathématique »), la Science est ainsi passée « du monde de l'«à-peu-près» à l'univers de la précision »². Cette transition du qualitatif au quantitatif fut non seulement une aventure intellectuelle mais aussi une entreprise technique. Depuis l'Antiquité³, on a su mesurer des longueurs, des angles et des poids, d'où de bonnes connaissances en géométrie, en statique, en optique et en astronomie. Il a fallu apprendre à mieux mesurer le temps pour progresser en dynamique, et la physique a commencé à se développer après la Renaissance. Les mesures de température et de courant ont enfin

1. THOMSON, W., *Electrical Units of Measurement*, 1883.

2. Titre d'une étude d'Alexandre Koyré (*Critique*, n° 28, p. 806, 1948). L'hypothèse d'un cercle pour l'orbite de Mars conduisait Kepler à un écart de 8' avec les observations de Tycho Brahé : « Ces 8', qu'il n'est pas permis de négliger, vont nous donner les moyens de réformer toute l'astronomie » (*Astronomia nova*, 1609).

3. Voir par exemple LLOYD, G., « La science grecque et le problème de la mesure », *La Recherche*, juin 1988, p. 790.

conditionné les progrès en thermodynamique et en électromagnétisme (voir chronologie)⁴. Comme l'a écrit Bachelard, « on pourrait déterminer les différents âges d'une science par la technique de ses instruments de mesure »⁵.

Ainsi, *la science de la mesure est un outil, une technique au service de toutes les sciences d'observation* : elle permet de tirer le meilleur parti des observations et aussi, par un juste retour, d'améliorer les instruments pour obtenir ces observations. Elle est donc pluridisciplinaire. Mais il suffit de l'appeler « métrologie » pour rappeler à chacun des problèmes sordides de double pesée, de calcul d'erreur ou de changement d'unité. « La mesure séduit peu », reconnaît Comte-Sponville : « On préfère les prophètes, les démagogues, les tyrans, bien souvent, aux arpenteurs du réel, aux comptables sourcilieux du possible »⁶. « La mesure nous est étrangère, avouons-le ; ce qui nous excite, c'est l'attrait de l'infini, de la démesure »⁷, écrivait Nietzsche. Pis encore, la mesure inquiète certains par ses tendances normatives, par le risque réducteur d'une « barbarie mathématique qui, à force de mesurer tout, perd complètement le sens de la mesure »⁸.

Après avoir décrit quelques exemples choisis dans des domaines très divers pour donner un aperçu des pratiques de la mesure, nous nous intéresserons dans la première partie à ses principes, mais sans entrer dans le détail des applications. Celles-ci sont étudiées dans des ouvrages spécialisés, grandeur par grandeur (longueur, temps, etc.) ou discipline par discipline (astronomie, biologie, etc.) ; souvent,

4. Voir par exemple ROSMORDUC, J., *Une Histoire de la physique et de la chimie*, « Points », Seuil, Paris, 1985 ; PERDIJON, J., *Histoire de la physique*, « Topos », Dunod, Paris, 2008.

5. BACHELARD, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, 1938.

6. COMTE-SPONVILLE, A., in Cité des sciences et de l'industrie, *Mesures et démesure*, Paris, 1995.

7. NIETZSCHE, F., *Par-delà le bien et le mal*, 1886.

8. GUSDORF, G., « Sur l'ambiguïté des sciences de l'homme », *Diogène*, n° 26, p. 80, 1959.

elles sont même prises en charge par des logiciels qui évitent d'avoir à trop se poser de questions ! Puis nous réfléchissons dans la seconde partie au résultat obtenu.



MESURE DU MONDE, MONDE DE LA MESURE

Elle les fit ranger tous cinq en leur faisant mettre toutes pièces à découvert et, prenant son lacet, elle les mesura avec la plus grande exactitude, tant en longueur qu'en grosseur, soupesant même avec attention leurs dépendances.

MIRABEAU (*Le Rideau levé ou l'éducation de Laure*)

UN CLASSEMENT DES MESURES

On mesure pour savoir, connaître, contrôler, pour comparer, choisir, sélectionner, pour agir, décider, prévoir... Voyons sur quelques exemples comment se pratique la mesure. On peut tenter de classer les types de mesures suivant la grandeur qu'elles déterminent et le procédé qu'elles utilisent. Il existe clairement deux catégories bien distinctes de caractères mesurés, selon qu'il s'agit de grandeurs physiques ou d'opinions, et deux moyens d'interrogation tout aussi distincts, selon qu'il s'agit d'appareils dont le fonctionnement repose sur les lois de la physique, ou de questionnaires à base de langage. On en tire trois sortes de procédés : les instruments,

les indicateurs et les enquêtes (tableau 1 et figure 1)⁹. *L'instrument exploite un phénomène directement lié à la qualité étudiée, un indicateur se contente de phénomènes annexes, plus ou moins associés à la qualité étudiée, une enquête est fondée sur le langage.* Considérons par exemple la température. Une rapide enquête dans l'assemblée révèle qu'« il fait chaud ! », ce qui est confirmé par des indicateurs comme la transpiration ou la fonte de la neige, mais le scientifique préfère se fier à un instrument : le thermomètre. Pour la prévision du temps, la météorologie ne dispose malheureusement que d'indicateurs combinant des mesures diverses (température, pression, hygrométrie, etc.), mais on peut aussi faire une enquête auprès des paysans du coin. Enfin, d'autres notions comme le moral des ménages sont uniquement du ressort de l'enquête. À chaque domaine d'étude correspond donc un moyen privilégié : les instruments ou à défaut les indicateurs pour les sciences de la matière et de la vie, les indicateurs ou à défaut les enquêtes pour les sciences humaines et sociales.

Tableau 1 | Un classement des mesures. *On a classé les mesures selon leur objet et le moyen utilisé.*

Moyen de mesure	Caractère mesuré	
	Grandeur	Opinion
Physique	Instrument	Indicateur
Langage	(littérature)	Enquête

9. On a exclu la quatrième possibilité, qui correspond à une description littéraire (voir introduction).

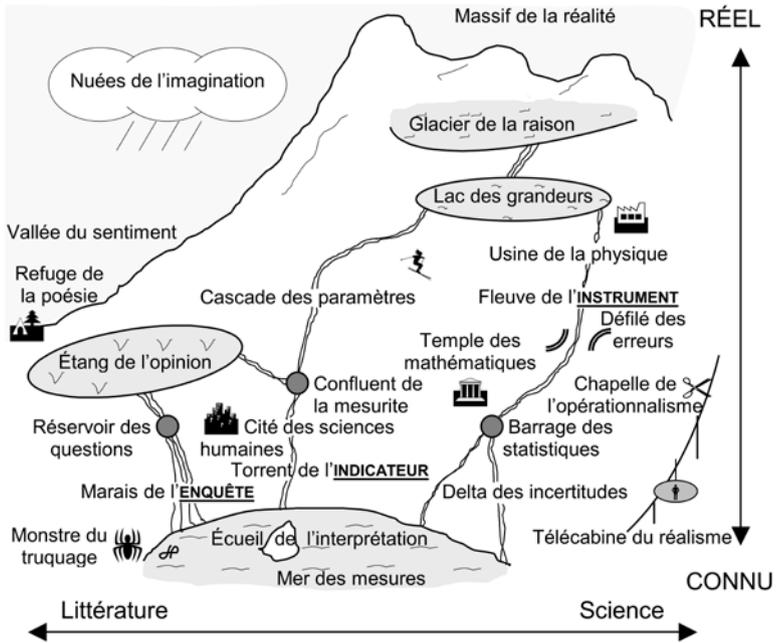


Figure 1 | Les pistes de la mesure. *Slalom entre les grandeurs, combiné des indications ou surf sur l'opinion.*

On voit que les indicateurs se situent à l'intersection entre instrument et enquête : ils utilisent des données objectives fournies par des instruments, mais on leur demande des informations subjectives, comme celles fournies par des enquêtes. Par exemple, l'indice de masse corporelle P/T^2 d'un individu est tout aussi objectif que sa taille T et son poids P , mesurables avec une toise et une balance, mais il devient un indicateur subjectif quand le caractère étudié est l'obésité. Ou bien encore, le temps de présence devant un poste de télévision est une donnée objective, mesurable par audimétrie, qui devient un indicateur subjectif quand le caractère étudié est l'intérêt manifesté pour l'émission diffusée. Les indicateurs sont donc particulièrement sensibles aux difficultés d'interprétation.

MESURE AVEC UN INSTRUMENT

Le physicien qui utilise un pycnomètre pour déterminer la densité d'un solide, le technicien qui vérifie le diamètre d'un tube avec un pied à coulisse ou le commerçant qui pèse des pommes de terre avec une balance font des mesures avec un instrument : c'est la mesure par excellence, souvent qualifiée de « physique », même quand elle est pratiquée par le chimiste ou le biologiste. À chaque fois, il s'agit de choisir – ou d'inventer – l'instrument le mieux adapté pour répondre au problème posé.

L'une des premières mesures physiques est probablement celle d'Archimède, inventeur du pycnomètre¹⁰, mais on pourrait aussi citer la mesure de la hauteur des pyramides par Thalès ou celle de la circonférence terrestre par Ératosthène (voir chronologie). À l'autre extrémité de l'Histoire, le physicien a tenté de mettre en évidence les ondes gravitationnelles. Ces ondes, prévues par la théorie de la relativité, sont des vibrations de l'espace-temps qui doivent se produire lors d'événements cosmiques mettant en jeu des masses énormes et des vitesses très grandes, tels que collisions de trous noirs ou explosions de supernovæ. La réalité de ces ondes a été prouvée indirectement en mesurant le ralentissement du mouvement de tournoiement d'un pulsar double, mais il serait intéressant de les mesurer directement afin d'ajouter un nouveau moyen d'investigation astronomique. Une onde gravitationnelle traversant un laboratoire en déforme l'espace-temps et modifie le temps mis par la lumière pour se propager d'une masse libre à une autre. Le principe de détection est donc simple : mesurer les variations de distance entre deux masses, ou celles de longueur d'un objet massif. La difficulté réside dans la faiblesse des variations attendues : de l'ordre de 10^{-21} en valeur relative pour les phénomènes les plus violents, un peu plus si le phénomène se produit plus près de nous, dans notre Galaxie ; pour des masses séparées de quelques kilomètres, la variation absolue n'est que de 10^{-18} m,

10. Voir VITRUE, *De architectura*, v. 30 av. J.-C.

soit environ le millième du rayon du noyau d'un atome ! Seules les techniques interférométriques sont capables d'atteindre ce niveau de sensibilité. Une première détection de la collision de deux trous noirs a été réussie par le dispositif LIGO en 2015¹¹.



La mesure physique | Marie Curie utilisait pour mesurer la radioactivité l'électromètre à quartz que Pierre et Jacques Curie avaient inventé. © Wellcome Library, London, CC BY 4.0.

Dans le domaine industriel, la qualité d'un produit est souvent définie comme étant son aptitude à satisfaire les besoins de ses utilisateurs. Cependant, une telle définition, qui fixe un but plutôt que des moyens, donne au qualificateur à peu près autant de pouvoir sur le

11. Voir par exemple DERUELLE, N. et LASOTA, J.-P., *Les Ondes gravitationnelles*, Odile Jacob, Paris, 2018.

produit que peut en avoir le météorologue sur le temps. Pour devenir opératoire, la qualité doit porter sur des grandeurs définies avant la fabrication, avec des tolérances clairement annoncées (cahier des charges), et sa gestion est l'ensemble des dispositions prises par l'entreprise pour donner confiance en la qualité de son produit. Parmi ces dispositions, deux se sont révélées depuis longtemps très efficaces : la surveillance des processus et le contrôle de conformité¹². Un tel contrôle est indispensable pour tout produit auquel sont attachés des impératifs de sécurité et de disponibilité ; c'est le cas par exemple du combustible d'un réacteur nucléaire. L'utilisation de matériaux dans des conditions de plus en plus sévères conduit à analyser leur composition et à contrôler leurs caractéristiques de manière de plus en plus approfondie. Or la plupart des propriétés importantes d'un produit ne peuvent être déterminées que de façon destructive (analyse chimique, essais mécaniques, examens microscopiques), donc sur un prélèvement. Pour que le jugement sur ce prélèvement puisse être étendu à l'ensemble du produit, il faut que ce prélèvement soit suffisamment important pour constituer un échantillon représentatif, auquel on peut appliquer les méthodes d'inférence statistique (voir chapitre 4) ; cependant, les techniques de contrôle non destructif, comme la radiographie ou les ultrasons, permettent de se contenter d'un échantillon restreint, en vérifiant l'homogénéité du produit par rapport au prélèvement.

Terminons par un exemple emprunté à la médecine : l'essai d'un nouveau médicament¹³. Avant sa mise sur le marché, une nouvelle molécule doit faire la preuve de son efficacité (quelle est alors la dose optimale ?), mais aussi de l'absence d'effets secondaires graves. L'évaluation est réalisée en plusieurs étapes. Tout d'abord, la molécule issue du laboratoire va être essayée sur des animaux. Quand

12. Voir par exemple PERDIJON, J., *Le Contrôle des matériaux*, « Que sais-je ? », Presses universitaires de France, Paris, 1996.

13. Voir par exemple SCHWARTZ, D., *Le Jeu de la science et du hasard*, « Champs », Flammarion, Paris, 1999.

